



UNIVERSIDAD DE CUENCA
Facultad de Ciencias Químicas.
Escuela de Ingeniería Ambiental.

“Evaluación de los modelos hidrológicos HEC-HMS Y HBV-light en la Subcuenca del Río Tomebamba”.

Trabajo de titulación previo
a la obtención del título de
Ingeniera Ambiental.

Autores:

Dania Fabiola Crespo Mora.

C.I. 0105687677.

Thalía Tatiana López Encalada.

C.I. 0705610475.

Director:

Ing. Alex Manuel Avilés Añazco PhD.

C.I. 0102247186.

Cuenca – Ecuador
30/09/2019

RESUMEN

En esta investigación se pretende representar el comportamiento hidrológico de la subcuenca del río Tomebamba mediante la evaluación de los procesos de generación de lluvia-escorrentía en dos puntos de monitoreo: La estación hidrológica Sururucho y La estación hidrológica Matadero.

Para evaluar el comportamiento dentro del área en estudio, se seleccionaron dos modelos hidrológicos aplicables a la zona: HEC-HMS y HVB-light con base en una revisión bibliográfica. Los resultados en función del índice de bondad KGE fueron insuficientes en la estación de Surucucho y satisfactorios en la estación de Matadero para ambos modelos. Así mismo, para la etapa de validación, HBV- light tiene valores superiores de KGE en comparación con HEC-HMS en ambos puntos de monitoreo. En base a estos resultados se determinó que HBV-light tuvo un mejor desempeño global, debido a que los valores de KGE fueron superiores a los obtenidos en HEC-HMS. Así mismo, al incorporar en la modelación diferentes usos de suelo, se comprobó que HEC-HMS considera la variación del uso de suelo, contrariamente al modelo HBV-light para el cual este factor no es influyente.

Finalmente, el análisis de sensibilidad indica que en HEC-HMS, el tiempo de retardo y numero de curva son los parámetros más sensibles, mientras que para HBV-light los parámetros que afectan más a la simulación son el valor de humedad del suelo sobre el cual la evapotranspiración actual alcanza la evapotranspiración potencial y el parámetro que determina la contribución relativa de la precipitación a la escorrentía.

Palabras clave: HEC-HMS. HBV-light. Modelación hidrológica. Criterios de eficiencia KGE. Cambio de uso de suelo. Análisis de sensibilidad.



ABSTRACT

This research aims to represent the hydrological behavior of the Tomebamba River Sub-basin through the evaluation of rain-runoff generation processes in two monitoring points: The Surucucho hydrological station and The Matadero hydrological station.

In order to evaluate the behavior within the study area, two hydrological models were established: HEC-HMS and HBV-light according with bibliographical data. The results based on the KGE goodness index showed that in the calibration stage were insufficient for Surucucho and satisfactory for Matadero for both models. Based on these results, it was determined that HBV-light has a better overall performance because KGE values were higher than those obtained in HEC-HMS. Likewise, for the validation stage, HBV-light has higher values of KGE than HEC-HMS in both monitoring points. By incorporating different land uses into the modeling, it was found that HEC-HMS considers the variation in land use contrary to HBV-light where this factor is not important.

Finally, the sensitivity analysis shows that lag time and curve number are the most sensitive parameters in HEC-HMS, while the most influential parameters in the simulation in HBV-light are the soil moisture value above which AET reaches PET, and the parameter that determines the relative contribution to runoff from rain.

Keywords: HEC-HMS. HBV-light. Hydrological modeling. Efficiency criteria KGE. Land use change. Sensitivity analysis.



Tabla de contenido

RESUMEN.....	2
ABSTRACT.....	3
1. ASPECTOS GENERALES.....	19
1.1 Introducción.....	19
1.2 Justificación.....	20
1.3 Objetivos.....	21
1.3.1 General:.....	21
1.3.2 Específicos:.....	21
2. MARCO TEÓRICO.....	22
2.1 Cuenca hidrográfica.....	22
2.2 Clasificación de cuencas hidrográficas.....	22
2.3 Ciclo hidrológico y balance hidrológico.....	23
2.4 Características de las cuencas altoandinas.....	24
2.4.1 División de las cuencas hidrográficas altoandinas.....	25
2.5 Modelos hidrológicos.....	25
2.5.1 Tipos de modelos hidrológicos.....	26
2.5.1.1 De acuerdo a la conceptualización de conceptos básicos.....	26
2.5.1.1.1 Caja negra.....	26
2.5.1.1.2 Caja Blanca.....	26
2.5.1.1.3 Caja Gris.....	27
2.5.1.2 De acuerdo a la naturaleza de algoritmos básicos.....	27
2.5.1.3 De acuerdo a su distribución espacial.....	28
2.5.1.3.1 Modelos agregados o agrupados.....	28
2.5.1.3.2 Modelos distribuidos.....	28
2.5.1.3.3 Modelos semidistribuidos.....	28
2.6 Modelación hidrológica en cuencas de alta montaña.....	29
2.6.1 Revisión de modelos hidrológicos aplicables.....	29
3. METODOLOGÍA.....	34
3.1 Área de estudio.....	34
3.2 Selección de los modelos hidrológicos a utilizarse en este estudio.....	39
3.3 Criterios de eficiencia.....	40
3.4 Requerimientos de los modelos hidrológicos seleccionados.....	41
3.5 Información disponible.....	41
3.5.1 Procesamiento de las series de precipitación, temperatura y caudal.....	43



3.5.2	Cálculo de la evapotranspiración potencial	49
3.6	Implementación de los modelos hidrológicos seleccionados.....	50
3.6.1	Descripción del modelo hidrológico HEC-HMS.....	51
3.6.1.1	Descripción de los parámetros de entrada en HEC-HMS.....	56
3.6.1.2	Calibración y validación.....	58
3.6.1.2.1	Estimación de los parámetros requeridos por HEC-HMS	59
3.6.1.2.2	Módulo pérdidas.....	60
3.6.1.2.2.1	Dosel.....	60
3.6.1.2.2.2	Superficie	61
3.6.1.2.2.3	Pérdidas.....	61
3.6.1.2.3	Módulo de transformación	67
3.6.1.2.4	Módulo de flujo Base.....	68
3.6.2	Descripción del modelo hidrológico HBV-light	69
3.6.2.1	Descripción de los parámetros de entrada requeridos por HBV- light.....	73
3.6.2.1.1	Cálculo de las zonas de elevación, vegetación y cuerpos de agua	74
3.6.2.2	Calibración y validación.....	75
3.7	Análisis de sensibilidad.....	76
4.	RESULTADOS.....	80
4.1	Resultados de la calibración.....	80
4.2	Resultados de la validación.....	85
4.3	Resultados de la influencia del cambio de uso de suelo sobre el caudal.....	101
4.3.1	HEC-HMS	101
4.3.2	HBV-light.....	102
4.4	Resultados del análisis de sensibilidad	103
4.4.1	HEC-HMS	104
4.4.2	HBV-light.....	107
5.	DISCUSIÓN	110
6.	CONCLUSIONES	112
7.	RECOMENDACIONES	114
8.	REFERENCIAS.....	115
9.	ANEXOS.....	124



Índice de tablas

Tabla 1. Microcuencas y sus áreas.....	35
Tabla 2. Cobertura vegetal en la Subcuenca del Tomebamba año 2014.	36
Tabla 3. Valores Referenciales de Nash-Sutcliffe a escala diaria.....	41
Tabla 4. Requerimientos de modelos hidrológicos.....	41
Tabla 5. Estaciones meteorológicas e hidrológicas del INAMHI.....	42
Tabla 6. Porcentaje de datos vacíos para las estaciones de precipitación.	43
Tabla 7. Porcentaje de datos vacíos para las estaciones de temperatura.	43
Tabla 8. Valores de temperatura en el día 1	46
Tabla 9. Datos de temperatura estimados en las estaciones de interés en el día 1.	47
Tabla 10. Porcentaje de datos vacíos para las estaciones hidrológicas.	47
Tabla 11. Datos requeridos para cada etapa de la modelación hidrológica en HEC-HMS	57
Tabla 12. Periodos de modelación considerando la cobertura vegetal.....	59
Tabla 13. Equivalencias entre las clases de textura del USDA y los grupos hidrológicos.	62
Tabla 14. Reclasificación de textura del suelo.	63
Tabla 15. Reclasificación de usos de Suelo SCS.....	64
Tabla 16. Clasificación de uso del suelo o cobertura vegetal.	64
Tabla 17. Valor del número de curva según intersección de uso de suelo reclasificado y textura de suelo reclasificada.....	65
Tabla 18. Número de curva correspondiente a cada una de las microcuencas considerando el paso de tiempo.....	67
Tabla 19. Tiempo de retardo de cada microcuenca obtenido mediante calibración manual	68
Tabla 20. Coeficiente de agua subterránea correspondiente a cada una de las microcuencas.....	69
Tabla 21. Parámetros de entrada del modelo hidrológico HBV- light.	73
Tabla 22. Zonas de vegetación y cuerpos de agua en la microcuenca 1.	74
Tabla 23. Zonas de vegetación y cuerpos de agua en la microcuenca 2.	74
Tabla 24. Límites de calibración para Monte Carlo y parámetros calibrados para HBV- light.....	76
Tabla 25. Parámetros del modelo HEC-HMS.....	79
Tabla 26. Parámetros del modelo HBV-light	79
Tabla 27. Valores de los índices de eficiencia en el periodo de calibración en HEC-HMS y HBV-light	80
Tabla 28. Resultados de KGE, sesgo, r y R^2 en el periodo de calibración.....	85
Tabla 29. Valores de los índices de eficiencia en los periodos de validación en HEC-HMS y HBV-light	85
Tabla 30. Resultados de KGE, Sesgo, r y R^2 en el periodo de validación.	101
Tabla 31. Valores de EMC y sesgo para el análisis de sensibilidad en HEC-HMS.....	106
Tabla 32. Valores de EMC y sesgo para el análisis de sensibilidad en HBV-light	109

Índice de figuras

Figura 1. Ubicación de la Subcuenca del Río Tomebamba	34
Figura 2. Mapa de Microcuencas del Río Tomebamba	35
Figura 3. Distribución de la cobertura vegetal en la Subcuenca del Tomebamba	36
Figura 4. Mapa de la distribución taxonómica del suelo en la Subcuenca del Tomebamba.	38
Figura 5. Ubicación de las estaciones hidrológicas y meteorológicas en la Subcuenca del Tomebamba.....	42
Figura 6. Ecuación de gradiente térmico para día 1	46
Figura 7. Esquema del método de Soil Moisture Accounting	52
Figura 8. Esquema original del reservorio lineal.....	55
Figura 9. Esquema de modelación híbrida aplicada en HEC-HMS	56
Figura 10. División de la subcuenca del río Tomebamba para la modelación en HEC-HMS	58
Figura 11. Simulación hidrológica en la estación Surucucho incluyendo el período de calentamiento en HEC-HMS.	60
Figura 12. Mapa de los grupos hidrológicos del suelo.....	63
Figura 13. Mapa de la distribución del uso del suelo según la reclasificación del SCS	65
Figura 14. Valor del número de curva tomando considerando la variación de la cobertura vegetal.....	66
Figura 15. Estructura estándar del modelo HBV- light.....	72
Figura 16. Esquema de modelación aplicada en HBV-light.....	72
Figura 17. División de la subcuenca del río Tomebamba para la modelación en HBV-light.	75
Figura 18. Hidrograma de caudales simulados y observados en HEC-HMS durante la calibración en Surucucho.....	81
Figura 19. Hidrograma de caudales simulados y observados en HBV-light durante la calibración en Surucucho.....	81
Figura 20. Hidrograma de caudales simulados y observados en HEC-HMS durante la calibración en Matadero.....	82
Figura 21. Hidrograma de caudales simulados y observados en HBV-light durante la calibración en Matadero.....	82
Figura 22. Balance hidrológico para HEC-HMS y HBV-light durante la calibración en Surucucho.	83
Figura 23. Balance hidrológico para HEC-HMS y HBV-light durante la calibración en Matadero.	83
Figura 24. Relación entre el caudal simulado y observado en HEC-HMS durante la calibración en Surucucho.....	84
Figura 25. Relación entre el caudal simulado y observado en HBV-light durante la calibración en Surucucho.....	84
Figura 26. Relación entre el caudal simulado y observado en HEC-HMS durante la calibración en Matadero.....	84



Figura 27. Relación entre el caudal simulado y observado en HBV-light durante la calibración en Matadero.....	84
Figura 28. Hidrograma de caudales simulados y observados en HEC-HMS durante la validación 1991-1994 en Surucucho.	86
Figura 29. Hidrograma de caudales simulados y observados en HBV-light durante la validación 1991-1994 en Surucucho.	87
Figura 30. Hidrograma de caudales simulados y observados en HEC-HMS durante la validación 1991-1994 en Matadero.	87
Figura 31. Hidrograma de caudales simulados y observados en HBV-light durante la validación 1991-1994 en Matadero.	87
Figura 32. Balance hidrológico para HEC-HMS y HBV-light durante la validación 1991-1994 en Surucucho.....	88
Figura 33. Balance hidrológico para HEC-HMS y HBV-light durante la validación 1991-1994 en Matadero.....	88
Figura 34. Relación entre el caudal simulado y observado en HEC-HMS durante la validación 1991-1994 en Surucucho.	89
Figura 35. Relación entre el caudal simulado y observado en HBV-light durante la validación 1991-1994 en Surucucho.....	89
Figura 36. Relación entre el caudal simulado y observado en HEC-HMS durante la validación 1991-1994 en Matadero.	89
Figura 37. Relación entre el caudal simulado y observado en HBV-light durante la validación 1991-1994 en Matadero.....	89
Figura 38. Hidrograma de caudales simulados y observados en HEC-HMS durante la validación 1995-2003 en Surucucho.	90
Figura 39. Hidrograma de caudales simulados y observados en HBV-Llight durante la validación 1995-2003 en Surucucho.	90
Figura 40. Hidrograma de caudales simulados y observados en HEC-HMS durante la validación 1995-2003 en Matadero.	90
Figura 41. Hidrograma de caudales simulados y observados en HBV-light durante la validación 1995-2003 en Matadero.	91
Figura 42. Balance hidrológico para HEC-HMS y HBV-light durante la validación 1995-2003 en Surucucho.....	91
Figura 43. Balance hidrológico para HEC-HMS y HBV-light durante la validación 1995-2003 en Matadero.....	92
Figura 44. Relación entre el caudal simulado y observado en HEC-HMS durante la validación 1995-2003 en Surucucho.	92
Figura 45. Relación entre el caudal simulado y observado en HBV-light durante la validación 1995-2003 en Surucucho.....	92
Figura 46. Relación entre el caudal simulado y observado en HEC-HMS durante la validación 1995-2003 en Matadero.	93
Figura 47. Relación entre el caudal simulado y observado en HBV-light durante la validación 1995-2003 en Matadero.....	93
Figura 48. Hidrograma de caudales simulados y observados en HEC-HMS durante la validación 2004-2010 en Surucucho.....	93



Figura 49. Hidrograma de caudales simulados y observados en HBV-light durante la validación 2004-2010 en Surucucho.....	94
Figura 50. Hidrograma de caudales simulados y observados en HEC-HMS durante la validación 2004-2010 en Matadero.	94
Figura 51. Hidrograma de caudales simulados y observados en HBV-light durante la validación 2004-2010 en Matadero.	94
Figura 52. Balance hidrológico para HEC-HMS y HBV-light durante la validación 2004-2010 en Surucucho.....	95
Figura 53. Balance hidrológico para HEC-HMS y HBV-light durante la validación 2004-2010 Matadero.	95
Figura 54. Relación entre el caudal simulado y observado en HEC-HMS durante la validación 2004-2010 en Surucucho.	96
Figura 55. Relación entre el caudal simulado y observado en HBV-light durante la validación 2004-2010 en Surucucho.....	96
Figura 56. Relación entre el caudal simulado y observado en HEC-HMS durante la validación 2004-2010 en Matadero.	96
Figura 57. Relación entre el caudal simulado y observado en HBV-light durante la validación 2004-2010 en Matadero.....	96
Figura 58. Hidrograma de caudales simulados y observados en HEC-HMS durante la validación 2011-2014 en Surucucho.....	97
Figura 59. Hidrograma de caudales simulados y observados en HBV-light durante la validación 2011-2014 en Surucucho.....	97
Figura 60. Hidrograma de caudales simulados y observados en HEC-HMS durante la validación 2011-2014 en Matadero.	98
Figura 61. Hidrograma de caudales simulados y observados en HBV-light durante la validación 2011-2014 en Matadero.	98
Figura 62. Balance hidrológico para HEC-HMS y HBV-light durante la validación 2011-2014 en Surucucho.....	99
Figura 63. Balance hidrológico para HEC-HMS y HBV-light durante la validación 2011-2014 en Matadero.....	99
Figura 64. Relación entre el caudal simulado y observado en HEC-HMS durante la validación 2011-2014 en Surucucho.	100
Figura 65. Relación entre el caudal simulado y observado en HBV-light durante la validación 2011-2014 en Surucucho.....	100
Figura 66. Relación entre el caudal simulado y observado en HEC-HMS durante la validación 2011-2014 en Matadero.	100
Figura 67. Relación entre el caudal simulado y observado en HBV-light durante la validación 2011-2014 en Matadero.....	100
Figura 68. Comparación de los valores de KGE en Surucucho al considerar y al despreciar el cambio de uso de suelo en HEC-HMS.	102
Figura 69. Comparación de los valores de KGE en Matadero al considerar y al despreciar el cambio de uso de suelo en HEC-HMS.	102
Figura 70. Comparación de los valores de KGE en Surucucho al considerar y al despreciar el cambio de uso de suelo en HBV-light.....	103



Figura 71. Comparación de los valores de KGE en Matadero al considerar y al despreciar el cambio de uso de suelo en HBV-light.....	103
Figura 72. Variación de parámetros resultado del análisis de sensibilidad en HEC-HMS	105
Figura 73. Variación de parámetros resultado del análisis de sensibilidad en HBV-light	107

Índice de ecuaciones

Ecuación 1. Índice de eficiencia Kling-Gupta (KGE).....	40
Ecuación 2. Normalización de datos a través de la división para la media.	44
Ecuación 3. Normalización a través de la estandarización.	44
Ecuación 4. Obtención de la serie ficticia	45
Ecuación 5. Test Estándar de Homogeneidad Normal (SNHT).	45
Ecuación 6. Estimación del peso de una estación con respecto a la distancia.	48
Ecuación 7. Estimación de una variable meteorológica según la interpolación IDW.	48
Ecuación 8. Estimación de la evapotranspiración en base a la temperatura.	49
Ecuación 9. Cálculo del índice de calor anual	49
Ecuación 10. Cálculo del parámetro a en función del índice de calor anual.	50
Ecuación 11. Evapotranspiración potencial por el método de Thornthwaite.	50
Ecuación 12. Precipitación neta	54
Ecuación 13. Ecuación de Temez para el cálculo del tiempo de concentración.	67
Ecuación 14. Ecuación de Kirpich para el cálculo del tiempo de retardo.....	67
Ecuación 15. Estimación del deshielo en HBV-light	70
Ecuación 16. Cálculo de la infiltración efectiva.....	70
Ecuación 17. Estimación de la evapotranspiración actual en HBV-light.	71
Ecuación 18. Error medio cuadrático (EMC).	77
Ecuación 19. Sesgo (PBIAS).	78

Índice de anexos

Anexo 1. Número máximo de horas de sol	124
Anexo 2. Proceso de interpolación IDW	125



Cláusula de Propiedad Intelectual

Yo, DANIA FABIOLA CRESPO MORA, autora del trabajo de titulación **“Evaluación de los modelos hidrológicos HEC-HMS y HBV-light en la Subcuenca del Río Tomebamba”**, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autora.

Cuenca, 30 de septiembre de 2019

Dania Fabiola Crespo Mora

C.I: 0105687677



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio
Institucional

Yo, DANIA FABIOLA CRESPO MORA, en calidad de autora y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación **"Evaluación de los modelos hidrológicos HEC-HMS y HBV-light en la Subcuenca del Río Tomebamba"**, de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos. Asimismo, autorizo a la universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 30 de septiembre de 2019

Dania Fabiola Crespo Mora

C.I: 0105687677

Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio

Institucional

Yo, THALÍA TATIANA LÓPEZ ENCALADA, en calidad de autora y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación **"Evaluación de los modelos hidrológicos HEC-HMS y HBV-light en la Subcuenca del Río Tomebamba"**, de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos. Asimismo, autorizo a la universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 30 de septiembre de 2019



Thalía Tatiana López Encalada

C.I: 0705610475

Cláusula de Propiedad Intelectual

Yo, THALÍA TATIANA LÓPEZ ENCALADA, autora del trabajo de titulación **"Evaluación de los modelos hidrológicos HEC-HMS y HBV-light en la Subcuenca del Río Tomebamba"**, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autora.

Cuenca, 30 de septiembre de 2019



Thalía Tatiana López Encalada

C.I: 0705610475



AGRADECIMIENTO

En primera instancia agradezco a nuestro director de tesis, el Ing. Alex Avilés por el apoyo brindado a lo largo del desarrollo de este proyecto, el Ing. Adrian Sucozhañay por la ayuda y asesoría ofrecida y especialmente al Ing. Stalin Jiménez por ser más que un tutor, un amigo que nos guio y motivó durante este proceso.

A mis padres, hermanas y sobrinos quienes son mi soporte y la razón de seguir adelante. A mis amigos Jessy, Ivonne y Fabián con quienes he compartido esta etapa de mi vida y he aprendido tanto. Finalmente, quiero agradecer a mi compañera Thalía y a mis profesores por impartir sus conocimientos y forjar mi camino como profesional.

Dania Fabiola Crespo Mora



DEDICATORIA

Esta tesis va dedicada a mi madre por su amor, entrega y dedicación y a mi padre quien, a pesar de ya no seguir a mi lado, aún sigue siendo mi gran inspiración.

Dania Fabiola Crespo Mora



AGRADECIMIENTO

Primero, debo agradecer a Dios por permitirme culminar una etapa más, manteniendo la voluntad y actitud para superar las adversidades que se me presentaron a lo largo de mi vida estudiantil. Así mismo, quiero agradecer a nuestro director de tesis, el Ing. Alex Manuel Avilés Añazco por los conocimientos impartidos durante todo este proyecto y de manera especial a nuestro asesor, el Ing. Stalin Daniel Jiménez quien con su guía, esfuerzo, apoyo y paciencia hicieron que este proyecto se torne educativo y entretenido.

Agradezco a la Universidad Estatal de Cuenca por brindarme la oportunidad de estudiar y forjarme como una profesional en lo que tanto me apasiona.

Finalmente, quiero agradecer a mi compañera Dania Fabiola Crespo Mora, por la paciencia que tuvo a lo largo de este trabajo, ya que, por su ayuda, esfuerzo y dedicación hoy por hoy hemos culminado esta etapa. Son muchas las personas a las que me encantaría agradecerles su amistad, consejos, apoyo, ánimo y compañía en los momentos más difíciles de mi vida. Algunas están aquí conmigo y otras en mis recuerdos y en mi corazón, sin importar en donde estén quiero darles las gracias por formar parte de mí, por todo lo que me han brindado y por todas sus bendiciones. Para ellos, muchas gracias y que Dios los bendiga.

Thalía Tatiana López Encalada



DEDICATORIA

En primer lugar, quiero dedicar este trabajo a Dios por brindarme la vida y salud suficiente para cumplir uno de mis propósitos. A mi padre por su constante apoyo y de manera especial se lo dedico a mi madre, por ser un pilar fundamental en mi vida y demostrarme siempre su cariño y apoyo incondicional, su esfuerzo por brindarme lo mejor, me ha permitido llegar hasta este momento tan importante de mi formación profesional.

Esta tesis la dedico con todo mi amor y cariño a mi amado hijo Matthew por motivarme a superarme día a día, a mi esposo por acompañarme durante el desarrollo de todo este proyecto y por la confianza brindada, a mis sobrinos Nicolás y Fiorella quienes a pesar de su corta edad dibujan una indeleble sonrisa en mi rostro. Finalmente le dedico este trabajo a mis amigos, compañeros y a todas aquellas personas que de una u otra manera han contribuido para el logro de mis objetivos.

Thalía Tatiana López Encalada



1. ASPECTOS GENERALES

1.1 Introducción

El aumento de la población, el cambio climático y el cambio del uso de suelo repercuten directamente en la cantidad de agua en una cuenca, por ende, en la cantidad de agua disponible para las actividades ecosistémicas y antrópicas. En el caso de la subcuenca del Tomebamba, estudios recientes indican que ecosistemas localizados en zonas altas son más vulnerables al cambio climático (Albe, & Ogutveren, 2004) y que, en las últimas décadas, como resultado del incremento poblacional y actividades antrópicas la demanda de agua ha aumentado (Buytaert, 2013).

A lo largo de los años, se han desarrollado múltiples herramientas de modelamiento hidrológico que reflejan los procesos en el sistema de una cuenca hidrológica. La aplicabilidad de un modelo específico depende de las metas perseguidas, objetivos planteados, los datos disponibles, condiciones particulares del área por analizar, entre otros (Albek et al., 2004). En el estudio “Modelación hidrológica de microcuencas del páramo” publicado en 2007 por R. Celleri, se menciona que las herramientas HEC-HMS, TOPMODEL y SWAT, se encuentran entre los modelos más apropiados para el estudio del comportamiento hidrológico de las subcuencas Dudas, Matadero, Mazar o Tomebamba (Timbe, 2008). No obstante, se debe mencionar que esas no son las únicas herramientas de modelación hidrológica existentes, por ello, se explorarán otros modelos hidrológicos que también puedan ser factibles de aplicar en la subcuenca (Széles, 2013).



1.2 Justificación

La subcuenca de río Tomebamba constituye una de las fuentes hídricas más importantes de la región debido a los múltiples servicios hidrológicos que ofrece como el abastecimiento de agua y la producción agropecuaria. Todas estas actividades se ven afectadas por el cambio de uso de suelo y las épocas de avenida y estiaje. Por ello es importante interpretar el proceso hidrológico que ocurre en este ecosistema alto andino y conocer cómo es la distribución temporal del agua en la misma (Buytaert, 2012).

Al no existir un solo modelo que sea aplicable a todas las cuencas es importante establecer un modelo hidrológico que se ajuste a la zona de estudio y cuyos resultados ofrezcan un cierto grado de confianza, para que las decisiones que se tomen en cuanto al manejo integral de la subcuenca, tengan una base fiable (Albek et al., 2004).



1.3 Objetivos

1.3.1 General:

Representar el comportamiento hidrológico de la subcuenca del río Tomebamba mediante herramientas de modelación hidrológica.

1.3.2 Específicos:

- Seleccionar los modelos hidrológicos que mejor se ajusten a las características de la zona de estudio mediante la evaluación de criterios de selección.
- Calibrar y validar los modelos hidrológicos seleccionados a partir de la información requerida por cada modelo.
- Evaluar la influencia del cambio de uso de suelo sobre el caudal simulado por cada modelo hidrológico.
- Realizar un análisis de sensibilidad para identificar los parámetros que más influyen en el ciclo hidrológico de la subcuenca del Tomebamba según los modelos hidrológicos.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Cuenca hidrográfica

Es el espacio de territorio delimitado por la línea divisoria de aguas, constituido por un sistema hídrico que desemboca en un lugar o punto de descarga que generalmente es un río, lago o mar (World Vision, 2004). La cuenca hidrográfica es un área que contiene recursos naturales y en donde habitan poblaciones urbanas o rurales que llevan a cabo actividades que demandan agua para su desarrollo (Aguirre, 2011). También podemos definirla como un sistema, en donde es considerada como una unidad integrada por componentes interdependientes que influyen en su comportamiento (Gaspari, & Rodriguez, 2013). Entre los principales componentes se encuentran los biofísicos, sociocultural-económico y demográficos (Faustino, 2002).

Los componentes biofísicos se definen como la integración de los elementos biológicos y físicos que conforman la cuenca. El primero describe la flora y fauna existente, incluyendo los elementos cultivados por los pobladores y el segundo se relaciona con elementos específicos como el tipo y uso del suelo, hidrología, clima, topografía, geología (García, 2008). El componente sociocultural-económico se relacionan a los grupos humanos asentados en un espacio territorial dentro de la cuenca hidrográfica y desarrollan actividades para el aprovechamiento y transformación de los recursos naturales en bienes y servicios. Finalmente, los componentes demográficos hacen referencia al tamaño y clasificación de la comunidad asentada en la cuenca según edad, sexo, ocupación, población económicamente activa, entre otros (Faustino, 2002).

2.2 Clasificación de cuencas hidrográficas

No existe una única clasificación para las cuencas hidrográficas. Para ello se consideran varios criterios morfológicos, meteorológicos e hídricos (Ibáñez, 2012). Entre los más destacados se incluyen el sistema de drenaje, tamaño de la cuenca y el relieve (Faustino, 2002).

Con relación a la red de drenaje, las cuencas hidrográficas son arreicas, criptorreicas, endorreicas y exorreicas. Son arreicas si sus aguas no drenan en otras fuentes superficiales o subterráneas y se pierden por evaporación o infiltración; criptorreicas cuando el sistema

de drenaje fluye como un río subterráneo; endorreicas cuando sus aguas alcanzan un embalse o lago sin llegar al mar y exorreicas cuando sus aguas desembocan en un sistema mayor de drenaje como un gran río o mar (World Vision, 2004; Cocoango, 2014).

Considerando el tamaño, las microcuencas poseen áreas de 10 a 500 km², las subcuencas de 500 a 2000 km² y las cuencas más de 2000 km² (Faustino, 2002). Así mismo, basado en el relieve y posición de la cuenca se la puede considerar como cuenca de llanura y cuenca de montaña (Gaspari et. al, 2013).

2.3 Ciclo hidrológico y balance hidrológico

El ciclo hidrológico es un proceso que comprende la entrada, almacenamiento y la salida de aguas en la hidrósfera, litósfera y atmósfera (Orsolini, Zimmermann, & Basile, 2000). El ciclo está constituido por un conjunto de procesos interrelacionados entre sí mediante la evaporación, transpiración, circulación atmosférica, condensación, intercepción, precipitación, flujo superficial y subterráneo. Cada proceso varía conforme las condiciones de presión y temperatura del área en donde se produzcan (Gutierrez, 2014).

Se origina como consecuencia de la energía irradiada por el sol capaz de evaporar las masas de agua y la gravedad que permite la precipitación y escurrimiento del agua. Parte de la precipitación se evapora, se infiltra o circula por la superficie terrestre en donde se acumula hasta conformar arroyos, ríos, lagos, embalses o mares (Aranda, 1984). En una cuenca hidrográfica este ciclo no es homogéneo debido a que, a lo largo de la cuenca, existen zonas que no aportan al flujo de agua o el sentido de circulación del líquido varía de horizontal a vertical, antes de llegar al cauce principal (Gaspari et. al, 2013).

El balance hidrológico es un proceso que relaciona todas las variables que influyen en el ciclo hidrológico y supone la medición de los flujos de agua o caudales y su almacenamiento. Al definir el balance hídrico en una cuenca se obtiene información sobre el volumen de escurrimiento o excedente, la infiltración o recarga del acuífero, el período de sequía y el cálculo de demanda de agua para riego en un tiempo definido. Está compuesto por una parte activa que corresponde al escurrimiento y evaporación en un periodo de tiempo y una parte pasiva compuesta por la precipitación (Maderey, 2005).

Con el balance hidrológico se puede cuantificar la cantidad de agua que ingresa, principalmente como precipitación y la cantidad de agua que sale, ya sea, mediante el cauce

de un río principal o por los diversos usos que las comunidades den al recurso (World Vision, 2004).

2.4 Características de las cuencas altoandinas

Los ecosistemas de montaña son fundamentales para el desarrollo de diversas actividades humanas y ecológicas, debido a que representan una fuente de agua dulce de gran importancia (World Vision, 2004). Dentro de los ecosistemas de alta montaña, los páramos son clave en el suministro de agua dulce para las comunidades andinas de la región. Las características físicas, químicas y biológicas del suelo volcánico, así como el clima y topografía propio del páramo contribuyen a que el flujo de agua proveniente de estas regiones se caracterice por ser más sostenido, debido a la capacidad regulatoria del recurso hídrico (Buytaert, Célleri, & Bièvre, 2003).

Las cuencas altoandinas se encuentran bajo la influencia de los siguientes factores físicos:

- Cordillera de los Andes

De la cordillera se desprenden gran parte de las cuencas hidrográficas del callejón interandino que reviven aportes de agua provenientes de glaciares, lagos, acuíferos y eventos aluviales catastróficos (Pourrut, Gomez, Bermeo, & Segovia, 1995). Los Andes, delimita las cuencas hidrográficas y simultáneamente divide los flujos de aguas entre las vertientes del mar Caribe, Atlántico y océano Pacífico. Entre los sucesos que se ven influenciados por la presencia de esta cadena montañosa se encuentra el ciclo hidrológico, debido a que las montañas captan las masas de aire y almacenan las masas de agua que precipitan como nieve derretida en verano. Estos aportes de agua son esenciales en los periodos de sequías para las poblaciones y ecosistemas de las partes de bajas de una cuenca (World Vision, 2004). La degradación de los suelos en las partes alta y media de la cordillera afecta de forma directa en calidad del agua disponible, debido a la presencia de sedimentos que posteriormente llegan a los océanos (Vásquez, Mejía, Faustino, & Terán, 2016). Así mismo, el gradiente altitudinal influye en la precipitación debido a que las laderas al este de los Andes que se dirigen a la cuenca del Amazonas son propensas a tener precipitaciones de entre 400 mm a 800 mm, mientras que las laderas que se dirigen al oeste de los Andes presentan precipitaciones entre los 2000 mm a 2500 mm o más (Buytaert, 2012).



- Océano Pacífico y Océano Atlántico

La presencia de los Océanos Pacífico y Atlántico afecta directamente a las partes bajas de las cuencas, los suelos de esta zona se encuentran expuestos al mar y la evaporación que lo que los hace propensos a la salinización (Vásquez et al., 2016).

- Región amazónica

La Amazonía, conformada por bosque tropical, alberga la mayor tasa de biodiversidad del mundo y es de gran importancia, principalmente por la depuración del CO₂ del aire. La unión de la región Amazónica con la Cordillera de los Andes genera gran cantidad de pisos altitudinales con distintos climas y microclimas que favorece la biodiversidad animal y vegetal de la zona, convirtiéndola en una importante reserva de agua del planeta (Vásquez et al., 2016).

2.4.1 División de las cuencas hidrográficas altoandinas

La parte alta o cabecera de cuenca se encuentra a alturas mayores a 3000 m s. n. m. y en ocasiones llega hasta los 6500 m s. n. m.. A esta altitud se puede encontrar la mayor cantidad de agua en forma de nevados y altas precipitaciones que oscilan entre 800 mm hasta 1600 mm por año. Debido a que presenta pendientes empinadas, esta zona es propensa a la erosión. Desde aquí, agua con mayor calidad fluye hasta las partes medias y bajas de la cuenca. La parte media es el área comprendida entre los 800 y 3000 m s. n. m. con precipitaciones que varían entre los 100 mm hasta 800 mm anuales. Aquí se localizan los valles interandinos ocupados por pequeñas ciudades con una activa economía. Finalmente, la parte baja corresponde a la zona con poca pendiente de la cuenca, va desde el nivel del mar hasta los 800 m s. n. m. y presenta precipitaciones promedio menores a 100 mm. Aquí se ubican los grandes valles de la costa con medianas y grandes ciudades, cuya economía es dinámica debido a la actividad agropecuaria (Vásquez et al., 2016).

2.5 Modelos hidrológicos

Son sistemas de ecuaciones y procedimientos compuestos por variables y parámetros, usados principalmente para predecir el comportamiento de una cuenca y comprender

diversos procesos hidrológicos. Permiten estudiar la relación causa-efecto de una cuenca a través de datos de entrada y salida logrando un mejor entendimiento de los procesos físicos hidrológicos que tienen lugar dentro de la cuenca (Tucci & Sul, 1998). Un modelo consta de varios parámetros que definen sus características y lo diferencian de otros. Las dos entradas importantes requeridas para todos los modelos son los datos meteorológicos y el área de drenaje. Adicionalmente, se consideran las propiedades del suelo, la cubierta vegetal, la topografía de la cuenca hidrográfica, el contenido de humedad del suelo, entre otros (Devia, Ganasri, & Dwarakish, 2015).

Existen numerosos modelos hidrológicos que pueden ser aplicados a cuencas grandes y complejas para representar los procesos que conforman el ciclo hidrológico, el balance hidrológico y sus componentes sobre alguna parte de la superficie o subsuperficie de la tierra (Devia et al., 2015). Los modelos hidrológicos son hoy en día considerados como una herramienta importante y necesaria para la gestión de recursos hídricos y ambientales (Mendoza, López, & Bravo, 2002).

2.5.1 Tipos de modelos hidrológicos

Los modelos hidrológicos se pueden clasificar de varias maneras según criterios de interés, pero existen 3 características básicas que resultan ser útiles para su clasificación (Remesan, & Mathew, 2015):

2.5.1.1 De acuerdo a la conceptualización de conceptos básicos

2.5.1.1.1 Caja negra

También se conocen como modelos empíricos. En estos se da una relación calibrada de entradas y salidas sin ningún intento de describir el comportamiento causado por procesos individuales. La mayor ventaja de dicho modelo es la facilidad de uso y uno de los inconvenientes principales es la imposibilidad de extrapolar un modelo de este tipo a zonas o condiciones distintas, es decir que son válidos solo dentro de los límites; además del poco conocimiento que aporta del sistema (Mejuto, Mayorga, & Fernández, 1997)

2.5.1.1.2 Caja Blanca

Se llaman también de base física o teóricos. Estos modelos se apoyan en ecuaciones físicas que representan todos los procesos involucrados en el fenómeno a simular y debido

a que generan gran incertidumbre, la calibración se vuelve necesaria. Para su calibración no requiere datos hidrológicos y meteorológicos extensos, pero sí de la evaluación de un gran número de parámetros que describen las características físicas de la cuenca, como el contenido de humedad del suelo, la profundidad inicial del agua, la topografía, la topología, las dimensiones de la red fluvial, entre otros. Brindan una descripción detallada y potencialmente más correcta de los procesos hidrológicos en la cuenca que los otros tipos de modelos, debido al uso de parámetros que tienen una interpretación física (Refsgaard, 1996).

2.5.1.1.3 Caja Gris

Estos modelos que permiten conocer algunos de los procesos internos de la modelación, aunque no es posible conocer con exactitud todos los componentes de la cuenca y cómo interactúan. Generalmente, los parámetros que requiere el modelo no pueden evaluarse a partir únicamente de datos de campo, sino que deben obtenerse a través de la calibración (Mejuto et al., 1997; Refsgaard, 1996). En la calibración se requiere una gran cantidad de registros meteorológicos e hidrológicos e implica ajuste de curvas, lo que dificulta la interpretación y la confianza de la predicción (Devia et al., 2015). Los modelos de caja gris son especialmente adecuados para la simulación del proceso de precipitación-escurrimiento cuando existen series de tiempo hidrológicas lo suficientemente largas para la calibración del modelo (Refsgaard, 1996).

2.5.1.2 De acuerdo a la naturaleza de algoritmos básicos

Incluyen todos los modelos que expresan el comportamiento del sistema mediante un conjunto de ecuaciones, estos pueden agruparse como:

Modelo estocástico si alguna variable de la ecuación es considerada aleatoria o como una distribución de probabilidad (dependencia temporal de las variables hidrológicas relacionadas con el modelo) y modelo determinístico si las variables se consideran libres, es decir que ninguna tiene una distribución probabilística.

2.5.1.3 De acuerdo a su distribución espacial

2.5.1.3.1 Modelos agregados o agrupados

Consideran a la cuenca como un sistema homogéneo y único que posee características constantes. Asume que los procesos superficiales, sub-superficiales y subterráneos de una cuenca son homogéneos reduciendo los datos de entrada necesarios y las limitaciones en cuanto al desconocimiento de cierta información (Cabrera, 2012). Estos modelos muestran mayor efectividad en el modelamiento de cuencas muy pequeñas y generalmente tienen un mayor rendimiento a comparación con los modelos distribuidos, si el objetivo es calcular el caudal de salida en la cuenca. Como variables de ingreso se utilizan la precipitación, evapotranspiración y la superficie de la cuenca, mientras que el caudal de salida es útil para la calibración. Aunque no es necesario conocer los datos de topografía, tipo de vegetación y suelo, algunos métodos como el número de curva se basan en dicha información (Timbe, 2008).

2.5.1.3.2 Modelos distribuidos

En la realidad, las características de una cuenca varían mientras más grandes son, imposibilitando que los modelos agregados la representen más efectivamente (Cabrera, 2012). Los modelos distribuidos reconocen la variabilidad espacial de las cuencas hidrográficas y para su modelación requieren datos cada vez más precisos mientras se incrementa el nivel de detalle (Gómez, 2016). Para obtener la respuesta hidrológica de una cuenca, se identifican áreas con un comportamiento hidrológico parecido, se examinan todas ellas de manera independiente y se combinan sus efectos, lo que hace posible el estudio hidrológico de la cuenca como un todo y las subcuencas de forma independiente en cualquier punto. Como ventaja, estos modelos reproducen la respuesta hidrológica con mayor precisión porque no usan valores promedios de los parámetros hidrológicos, pero se hace necesario obtener mayor cantidad de información. Esto representa una desventaja si no se cuenta con dicha información o la base de datos está incompleta (Cabrera, 2012).

2.5.1.3.3 Modelos semidistribuidos

Los modelos semidistribuidos comparten características de los modelos agregados y los modelos distribuidos, debido a que utilizan menor cantidad de parámetros empleados de

forma simplificada (Gómez, 2016). Para la modelación se divide a la cuenca en varias subcuencas, a las cuales se les designa parámetros y características semejantes para posteriormente ser modeladas de forma agregada, aunque no sean homogéneas. Cada subcuenca es delimitada mediante unidades hidrogeomorfológicas que contienen los datos provenientes de las estaciones (Cabrera, 2012). Entre las ventajas se encuentra que estos modelos requieren menos datos de ingreso disminuyendo los requerimientos computacionales. Además, permite el modelamiento simplificados de cuencas más grandes con características geográficas, meteorológicas y litológicas más complejas y variables (Timbe, 2008).

2.6 Modelación hidrológica en cuencas de alta montaña

2.6.1 Revisión de modelos hidrológicos aplicables

A pesar de que existe una gran variedad de modelos hidrológicos, fueron seleccionados 9 modelos que según bibliografía han sido previamente aplicados en zonas de estudio con características similares a las de la subcuenca del Tomebamba. Estos se describen a continuación:

2.6.1.1 WEAP

Water Evaluation And Planning system (WEAP) es una herramienta computacional para la planificación integrada de recursos hídricos. Incluye diferentes procedimientos para el análisis de temas hidrológicos relacionados al clima, demanda de agua, balance hídrico, respuesta hidrológica de cuencas, condiciones regulatorias a través de su interfaz gráfica. Además, es un modelo conceptual y semidistribuido, forzado por variables climáticas que incluye rutinas diseñadas para distribuir el agua para diferentes tipos de usuarios (Gómez, 2016). Está basado en el principio de balance de masa; su uso está destinado para el modelamiento de cuencas con intereses municipales o agrícolas. Simula la escorrentía, recargas de aguas, calidad de agua, contaminantes presentes, análisis financieros de proyectos hídricos, entre otros. Puede simular los parámetros de interés según los escenarios hídricos y políticos establecidos, para ello se definen las características y objetivos del estudio o problema a tratar, se calibra el modelo mediante la caracterización de parámetros, se analiza los diferentes escenarios estableciendo supuestos y se evalúa

los resultados de cada escenario basándose en la disponibilidad de agua, costos y ganancias y alcance de metas ambientales.

2.6.1.2 HE-CHMS

Hydrologic Modeling System (HEC-HMS) es un modelo de base física y semidistribuido que simula procesos hidrológicos mediante métodos de precipitación-escorrentía a escala de eventos o de manera continua. Estima hidrogramas de escorrentía directa, pérdidas, flujo base y propagación de cauces en un periodo de tiempo determinado (Estrada, Moya, & Miguel, 2012). La integración de la aplicación HEC-GeoHMS permite calcular los valores promedios en GIS para posteriormente ser utilizados en el modelamiento hidrológico. HEC-GeoHMS representa el área de estudio en un mapa base dividido en celdas que contienen la información necesaria para el proceso.

2.6.1.3 TOPMODEL

El modelo hidrológico Topography based hydrological Model (TOPMODEL) es un modelo conceptual semidistribuido de base física que permite subdividir el área de estudio en elementos de menor tamaño. Para cada elemento se calcula el área aguas arriba que drena a través de cada sección, la longitud del área por el que transita el agua hacia otros elementos aguas abajo y la pendiente. El modelo requiere de modelo de elevación digital, datos hidrometeorológicos, valores de precipitación, el tiempo de drenaje del flujo de agua, evapotranspiración y descarga (Topmodel, 2011). El principio fundamental es la agregación de áreas hidrológicamente similares de la cuenca de captación de acuerdo con el valor de un índice topográfico estático. Esto, combinado con un enfoque paramétrico y un tratamiento directo de la evapotranspiración y el enrutamiento, simplifica la complejidad computacional y permite que el modelo se ejecute con extrema rapidez (Metcalf, Beven, & Freer, 2015). Las predicciones son sensibles a la calidad y resolución de los datos topográficos que se utilizan para derivarlos (Lane, Brookes, Kirkby, & Holden, 2004). El objetivo principal es calcular el déficit de almacenamiento o la profundidad de la capa freática en cualquier ubicación. El valor de déficit de almacenamiento es una función del índice topográfico (en función del área drenada por unidad de longitud de contorno y la pendiente de la superficie del suelo en la ubicación). El resultado será en forma de mapas de área o hidrogramas simulados (Devia et al., 2015).

2.6.1.4 SWAT

Soil and Water Assessment Tool (SWAT) simula varios procesos físicos relacionados a la practicas agrícolas y predice el impacto del manejo del suelo sobre el agua. El modelo semidistribuido capaz de describir el tránsito de agua y sedimentos, el crecimiento de la vegetación y la circulación de nutrientes. Para ello es necesario simular el ciclo hidrológico que integra la circulación total del agua en el área de captación (Devia et al., 2015). En el caso de la simulación de la respuesta hidrológica de una cuenca, esta se divide en varias subcuencas para trabajar con las diferentes áreas de la vertiente de acuerdo al espacio, facilitando el trabajo cuando la zona de estudio posee distintos usos de suelos y suelos con propiedades muy variadas que influyen directamente en la hidrología (Timbe, 2008). El modelo al tener una base física requiere información específica del clima, topografía, vegetación y prácticas de manejo de uso de suelo en la cuenca (Neitsch, Arnold, Kiniry, & Williams, 2011). Presenta la ventaja de modelamiento de datos para aquellas cuencas hidrográficas que no presentan datos de monitoreo. Además, el impacto relativo de datos de entrada alternativos en la calidad del agua y otras variables de interés, puede cuantificarse. Utiliza entradas que están fácilmente disponibles, realizando la simulación en cuencas muy grandes o que poseen gran variedad de estrategias de manejo, permitiendo estudiar impactos a largo plazo (Neitsch et al., 2011).

2.6.1.5 REW

Representative Elementary Watershed (REW) puede ser clasificado como semidistribuido y físico. A través de los años se han desarrollado varios modelos hidrológicos con base en los conceptos manejados por REW, algunos de ellos son: CREW, REWASH y TH model (Xu, Chen, Bi, Ouyan, & Ren, 2015). Basado en su enfoque, una cuenca se discretiza en varias subcuencas, llamadas REW. Cada REW consta de cinco subregiones a modelar, en las que se simulan flujos de agua basados en un procedimiento de acoplamiento de ecuaciones de conservación de masa y balance de momento; asimismo, los flujos simulados son: flujo de zona insaturada, flujo de zona saturada, flujo superficial de saturación, flujo superficial concentrado y flujo de canal (Reggiani, & Rientjes, 2005). Cada REW es la región espacial sobre la cual se agrega cada proceso hidrológico individual. Dentro de la cuenca, las REW están interconectadas por enlaces de canales, así como a través de rutas de flujo sub-superficial, también intercambian flujos de masa, impulso y energía (Xu et al., 2015). El proceso de modelado se lleva a cabo en dos pasos. Primero, se analiza su coherencia con los parámetros del modelo para poder evaluar su

comportamiento. En segundo lugar, las simulaciones del modelo se llevan a cabo con la precipitación observada y la serie de tiempo de la evaporación potencial, esto para evaluar el rendimiento del modelo (Reggiani, & Rientjes, 2005). Al dividir la cuenca en varias secciones se permite un estudio más detallado de la misma representando su respuesta hidrológica de forma precisa, siendo esta su principal ventaja (Xu et al., 2015).

2.6.1.6 RIBASIM

River Basin Simulation (RIBASIM) es un modelo distribuido desarrollado con el objetivo de ayudar en el manejo y gestión de cuencas hidrográficas, para ello simula el comportamiento de la cuenca bajo condiciones hidrológicas definidas. Está conformado por un paquete de modelos hidráulicos que consideran factores como la infraestructura, vertidos industriales, gestión, actividades de uso y demanda del agua para el modelamiento. De los procesos resultantes se obtienen patrones de distribución de agua que contribuyen al estudio de la calidad de recursos hídricos y al análisis de la sedimentación de ríos y embalses (Alcacer, 2015). Además, la información sobre el balance de agua proporcionado por el modelo, da al usuario una aproximación de la cantidad de agua disponible y su composición en cualquier momento y punto del recorrido del agua. Como parámetros de entrada se requieren datos de la demanda de agua actual y futura, la generación de contaminantes, el suministro de agua y los posibles escenarios (Rao, Potter, Webb, & Parkin, 2009). El software se encuentra disponible para Windows y posee una interfaz con sistemas de información geográfica (SIG) (Alcacer, 2015).

2.6.1.7 HBV-light

Hydrologiska Byråns Vattenbalans (HBV) es un modelo hidrológico conceptual desarrollado como agregado o semidistribuido aplicado en estudios de prefactibilidad de plantas de energía hidroeléctrica. En años recientes es empleado en investigaciones relacionadas al abastecimiento, seguridad de presas e irrigación de agua (Medina, & Muñoz, 2018). Relativo al manejo de cuencas, el modelo puede representar procesos de recarga de acuíferos subterráneos, humedad del suelo y pronóstico de crecidas a corto, mediano y largo plazo. Sus procesos se basan en el balance hídrico, por lo que incluye un módulo de humedad del suelo, un módulo de nieve y un módulo de respuesta. Además, utiliza a la subcuenca como unidad hidrológica básica. Para el proceso de modelamiento son necesarios datos hidrometeorológicos como: la precipitación, evapotranspiración, caudales

observados y temperatura. Adicionalmente, se solicita información relacionada a la geomorfología y condiciones iniciales de la cuenca. Entre las ventajas del modelo, este incluye varias opciones de representación gráfica, adicionalmente se pueden aplicar múltiples métodos de verificación de datos previos a la calibración y simulación (Medina, & Muñoz, 2018).

2.6.1.8 TOPKAPI

Topographic Kinematic Approximation and Integration (TOPKAPI) es un modelo hidrológico distribuido que usa parámetros físicos como el uso y tipo de suelo, edafología, MDT y otros para el desarrollo de sus procesos (Arevalo, Ortiz, Pujol, & Guna, 2007). El modelo asume que el flujo horizontal en un punto del suelo y en la superficie puede ser estimado usando un modelo de onda cinemática dentro de un pixel finito, transformando la ecuación diferencial original en una ecuación de depósito no lineal con una solución de origen numérico. Finalmente, se integra la información de los reservorios no lineales con datos de suelo, superficie y red de drenaje (Todini, & Ciarapica, 2002). Como ventajas, el modelo representa explícitamente los procesos de generación de escorrentía (Riccardi et al., 2013), además su aplicación puede darse en escalas espaciales crecientes sin perder la interpretación física del modelo y alterar la estimación de parámetros (Todini, & Ciarapica, 2002).

2.6.1.9 KOSTIAKOV

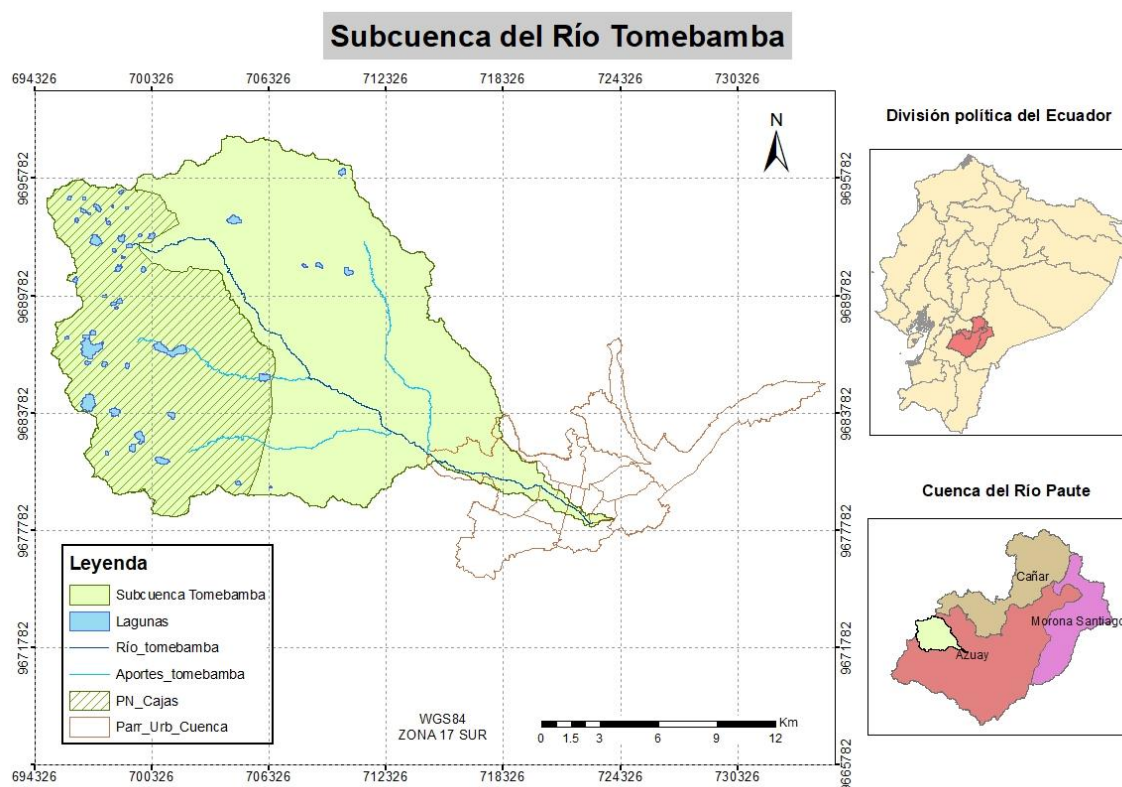
KOSTIAKOV es descrito como un modelo de infiltración, su principal objetivo es obtener una caracterización experimental más real de este proceso hidrológico. El modelo estima la tasa de infiltración y la infiltración acumulada de agua que se encuentran ligadas a las propiedades hidrofísicas del suelo. Debido a que el modelo no ha demostrado tener buenos resultados durante periodos prolongados de tiempo, se hace imposible establecer una tasa inicial de infiltración. A través de los años varios autores han realizado varias modificaciones que incluyen a la tasa base de infiltración como parámetro (Weber, & Apestegui, 2014).

3. METODOLOGÍA

3.1 Área de estudio

La subcuenca del río Tomebamba se localiza en la parte occidental de la cuenca del río Paute, con una equivalencia del 5,2% de la extensión del total de la cuenca (Cordero, Vanegas, & Hermida, 2015). Nace en el Parque Nacional Cajas, en sector de Tres Cruces, bordea el Centro Histórico de Cuenca donde se une con otros ríos siendo el Yanuncay su principal afluente (Segarra, 2016). La subcuenca posee una superficie total de 325,54 km² de la cual, el 80% pertenece al territorio de la parroquia Sayausí, 14% a San Joaquín y 6% a Cuenca (GAD San Joaquín, 2015). El cauce principal del río posee una longitud aproximada de 35,38 km, un caudal medio de 8 m³/s y una velocidad de 0,96 m/s. Así mismo, cuenta con una pendiente promedio de 42,57%, una altura media de 2443,07 m s. n. m. y en lo que respecta al clima, las zonas altas de la cuenca poseen una temperatura media anual que oscila entre 4°C y 8°C, mientras que en las zonas bajas entre 12°C y 15°C (Pesántez, 2015).

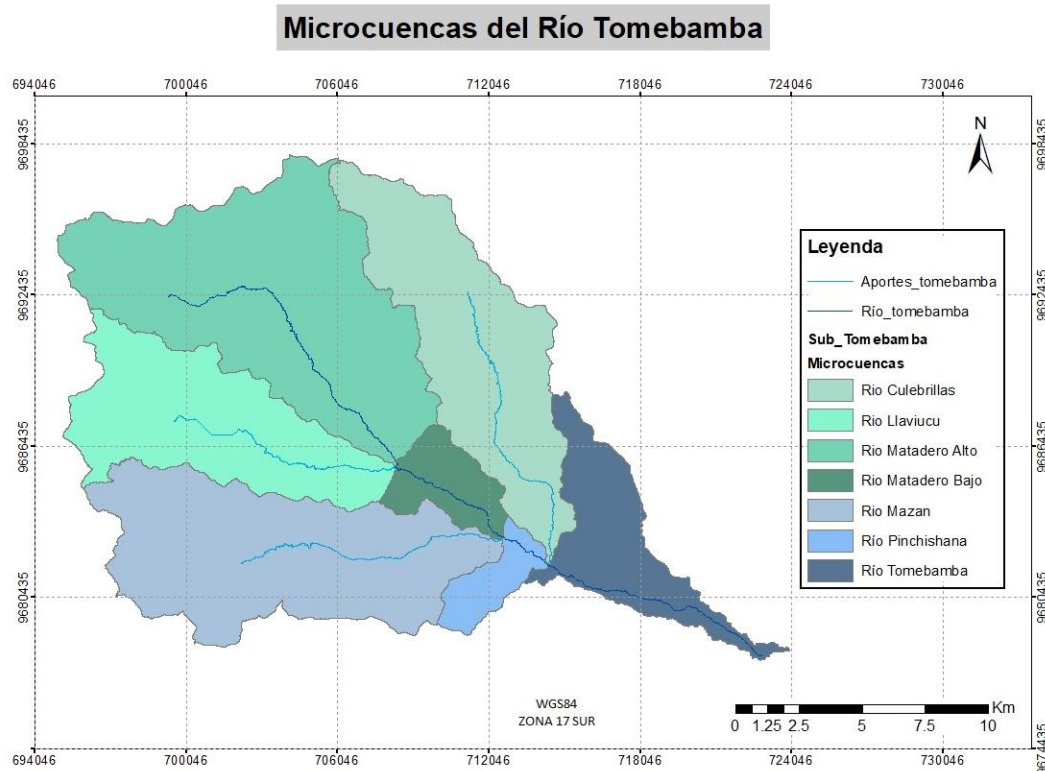
Figura 1. Ubicación de la Subcuenca del Río Tomebamba



Elaborado por: Crespo D, López T (2019)
Fuente: (Instituto Geofísico Militar [IGM], 2013)

La subcuenca conformada por las microcuencas de los ríos: Matadero alto, Culebrillas, Llaviucu, Matadero Bajo, Mazan, Pinchishana y Tomebamba, representadas en Figura 2.

Figura 2. Mapa de Microcuencas del Río Tomebamba



Elaborado por: Crespo D, López T (2019)

Fuente: (SENAGUA, 2002)

Tabla 1. Microcuencas y sus áreas

Microcuencas		Área [km ²]
ID	Nombre	
1	Río Matadero Alto	92,93
2	Río Culebrillas	60,37
3	Río Llaviucu	51,28
4	Río Matadero Bajo	12,21
5	Río Mazán	73,01
6	Río Pinchisana	8,48
7	Río Tomebamba	27,22

Elaborado por: Crespo D, López T (2019)

Dentro de la subcuenca se han identificado dos pisos climáticos: Frío Andino y Templado Interandino. El piso climático frío andino, propio en los páramos de la región andina, abarca sitios desde los 3200 m s. n. m. hasta 4700 m s. n. m., con temperaturas comprendidas entre 1°C y 10°C, donde se dan torrenciales aguaceros, neblinas espesas y lloviznas casi constantes, mientras que el piso climático templado interandino, corresponde a lugares desde los 2500 m s. n. m. hasta 3200 m s. n. m., con temperaturas de entre 10°C a 15°C. La época lluviosa (entre abril y septiembre) se caracteriza por ser templada con vientos frecuentes, mientras que en la época seca (entre octubre y marzo) se presentan vientos fuertes, aire seco y cálido (Donoso, 2009).

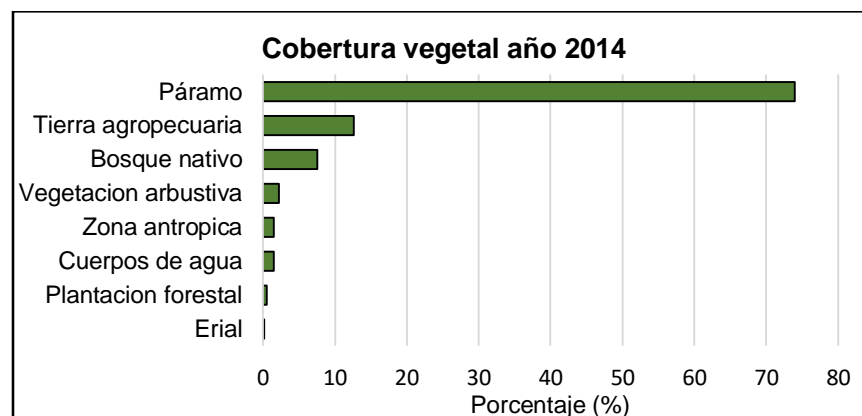
Según la información proporcionada por la Universidad del Azuay, la subcuenca cuenta con 7 tipos de cobertura vegetal:

Tabla 2. Cobertura vegetal en la Subcuenca del Tomebamba año 2014.

Descripción	Área (Km ²)	Porcentaje (%)
Plantación forestal	1,59	0,49
Bosque nativo	24,57	7,55
Páramo	240,89	73,99
Vegetación arbustiva y herbácea	7,2	2,21
Erial	0,51	0,16
Tierra agropecuaria	41,08	12,62
Zona antrópica	4,85	1,49

Elaborado por: Crespo D, López T (2019)
Fuente: (Universidad del Azuay, 2014)

Figura 3. Distribución de la cobertura vegetal en la Subcuenca del Tomebamba



Elaborado por: Crespo D, López T (2019)
Fuente: (Universidad del Azuay, 2014)

La parte alta de la subcuenca está conformada por un gran sistema lacustre dentro de los límites del Parque Nacional Cajas. Existen importantes excedentes de bosque nativo correspondiente a los sectores de Llaviuco, Mazán y Culebrillas (Peñafiel, 2014). Así mismo, en la parte baja se encuentran asentamientos, cultivos, pastos (el bosque nativo ha sido reemplazado por pastos), diversas plantaciones forestales con bosques de eucalipto y pino, los cuales representan una seria amenaza a estos ecosistemas. En la zona de estudio, el tipo de suelo es característico de cuencas altoandinas con presencia de páramo (GAD Sayausí, 2015).

En esta subcuenca encontramos espacios naturales protegidos, los cuales son considerados patrimonio natural, entre estos espacios tenemos: el Parque Nacional Cajas, con categoría de área protegida, acorde al Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SNAP) del Ecuador; el Bosque de Mazán, catalogado como reserva ecológica, incluido en la categoría de Áreas de Bosque y Vegetación Protectoras del Ministerio del Ambiente (GAD Cuenca, 2015); Machángara - Tomebamba con una área de 42 912 ha de las cuales 10 341 ha pertenecen a la subcuenca del Tomebamba; Dudahuayco, Guabidula y Fierroloma con un área dentro de la subcuenca de 309 ha, 705 ha y 213 ha respectivamente (Segarra, 2016).

Según la Oficina de Planificación de la Presidencia de la República del Ecuador (ODEPLAN) actual Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo (SENPLADES), en la subcuenca se encuentran 4 tipos diferentes de suelos clasificados según *Soil Taxonomy*, del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA), por sus siglas en inglés. Estos se agrupan en los siguientes órdenes (GAD Cuenca, 2015; INTAGRI, 2017; Natural Resources Conservation Services, 2015):

Inceptisol: Son suelos incipientes de baja o media evolución edáfica, presentan un cierto grado de desarrollo con una fertilidad muy variable. Dentro de la zona de estudio ocupan el 76% del territorio, se caracteriza por ser un suelo poco profundo de unos 30 cm a 40 cm de espesor con una textura pseudo limosa y fina. El suborden predominante corresponde a la categoría Andepts, caracterizado por ser un suelo untuoso con retención de agua.

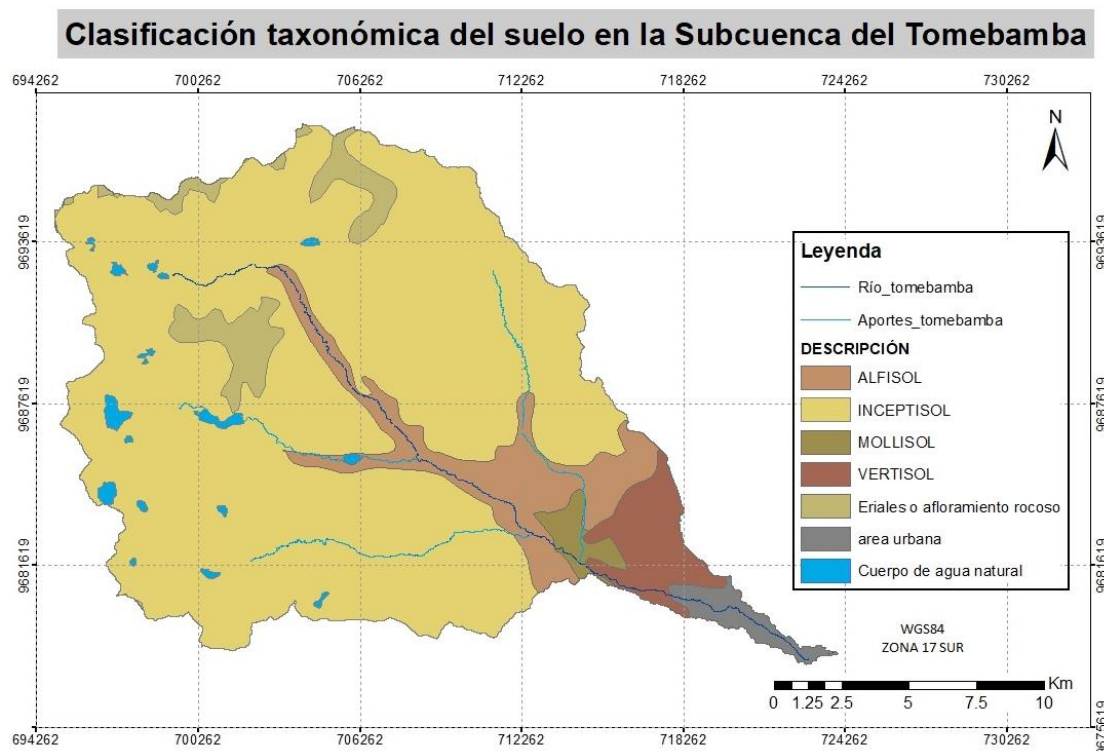
Alfisol: Se caracteriza por presentar altos porcentajes de arcilla que forman capas duras, impidiendo la penetración de raíces. Son suelos muy evolucionados que generalmente forman un horizonte argílico debido a la incorporación de arcilla por iluviación; debido a esta característica puede existir una muy baja conductividad hidráulica evitando el proceso de drenaje y contribuyendo a la acumulación de agua sobre el horizonte argílico. El suelo

presente en la subcuenca ocupa en 9.8% del territorio y tiene una textura arcillo-limosa y fina; el suborden predominante pertenece al tipo Udalfs que presenta un mejor drenaje a comparación de otros subórdenes.

Vertisol: Son suelos muy fértiles que tienen la capacidad de expandirse y contraerse por el alto contenido de arcilla que presentan (>35%), a consecuencia de la variación de humedad se generan grietas periódicamente. En la zona de estudio ocupa el 4,3% del territorio, se caracteriza por ser un material duro, poco meteorizado con un espesor de 40 cm a 60 cm, profundo o modernamente profundo. Tiene una textura arcillosa y fina; el suborden predominante corresponde al tipo Usters.

Mollisol: Suelos minerales con una superficie gruesa y alto contenido de materia orgánica, debido a sus características físicas y químicas son altamente productivos. En la subcuenca ocupa el 1,4% del territorio, posee un espesor de 30 cm a 50 cm que corresponde a poco profundo y moderadamente profundo; presenta una textura arcillo-arenosa y fina. El suborden predominante corresponde al tipo Udolls que presentan un cierto grado de drenaje.

Figura 4. Mapa de la distribución taxonómica del suelo en la Subcuenca del Tomebamba.



Elaborado por: Crespo D, López T (2019)
Fuente: (ODEPLAN, 2008)

En la subcuenca del Tomebamba existe un aprovechamiento múltiple del agua por parte de los habitantes de la ciudad de Cuenca y las parroquias de Sayausí y San Joaquín, entre los servicios que se generan se encuentran los siguientes (Segarra, 2016):

- Agua para consumo humano: Constituye la principal fuente de agua para la planta del Cebollar, entre otras. La planta del Cebollar provee agua potable para el 40% de la población de Cuenca y brinda tratamiento a un promedio de 800 l/s de agua.
- Agua para riego: Sirve de aporte para los canales de riego aprovechados por los usuarios de Sayausí y principalmente San Joaquín. El recurso agua es empleado en la actividad agrícola y ganadera.
- Agua para actividades artesanales: Usuarios de la parte baja de la subcuenca emplean el recurso hídrico, principalmente, en los procesos relacionados a la fabricación de ladrillos como parte de su sustento económico.

A lo largo de la subcuenca hidrográfica existen 15 captaciones de agua, de las cuales dos son realizadas por ETAPA EP en los sectores de Gulag y Culebrillas, 12 se destinan a los sistemas comunitarios de Sayausí y una captación ubicada en la zona alta de Minas-Bellavista que se utiliza para agua de riego para más de 105 socios (Segarra, 2016).

3.2 Selección de los modelos hidrológicos a utilizarse en este estudio

En primer lugar, se establece que los modelos a aplicar en esta investigación deben ser simples pero robustos cuyos parámetros de ingreso sigan el principio de parsimonia. Adicionalmente, se busca un programa de libre acceso, amigable con el usuario y que disponga de información como guías de usuario, páginas web, soporte en línea, entre otros que facilitará la solución de problemas referentes al manejo de los modelos (Cunderlik, 2003; Sarria, 2008).

Posterior al análisis de los modelos WEAP, HEC-HMS, TOPMODEL, SWAT, REW, RIBASIM, HBV-light, TOPKAPI y KOSTIAKOV, se estableció que los modelos HEC-HMS y HVB-light serán los empleados en este estudio. Esto, debido a que los principios de funcionamiento de ambos modelos son compatibles con los objetivos perseguidos por esta investigación y su exactitud en la representación de la respuesta hidrológica en cuencas altoandinas, con similares características, ha sido comprobada por varias investigaciones. Entre las que cabe mencionar el estudio “Asistencia técnica en hidrología para el desarrollo de herramientas de caracterización y monitoreo hidrológico y evaluación de alternativas de

gestión de los recursos hídricos.” realizado por Timbe (2008) señalan que la aplicación del modelo HEC-HMS en cuencas de páramo tiene muy buena aceptación debido a que posee el mismo performance que un modelo distribuido por lo que se obtienen resultados favorables con este modelo como con la aplicación de modelos más complejos. Finalmente, Sucozhañay (2018) aplicó el modelo HBV-light en la microcuenca de Zhurucay obteniendo resultados favorables.

3.3 Criterios de eficiencia

Existe una gran variedad de criterios de eficiencia que se pueden emplear para evaluar la capacidad predictiva de un modelo hidrológico. En el presente estudio se optó por emplear el índice Kling-Gupta Efficiency o KGE considerando que es una mejora del índice Nash-Sutcliffe Efficiency o NSE que ha sido ampliamente usado en la evaluación del desempeño de los modelos (Waseem, Mani, Andiego, & Usman, 2017).

Kling-Gupta Efficiency (KGE): La función KGE proviene de la descomposición del coeficiente NSE y resuelve el inconveniente en su aplicación, debido a que evita la subestimación en los valores máximos y de poca variabilidad al ponderar de forma equitativa los componentes de correlación, desviación y variabilidad. Varía entre 0 y 1 siendo este último el valor óptimo (Zúñiga, Muñoz, & Arumí, 2012).

Esta función se puede calcular mediante la siguiente ecuación (Zúñiga et al., 2012):

Ecuación 1. Índice de eficiencia Kling-Gupta (KGE).

$$KGE = 1 - \sqrt{(CC - 1)^2 + \left(\frac{cd}{rd} - 1\right)^2 + \left(\frac{cm}{rm} - 1\right)^2}$$

Donde:

CC: Valor del coeficiente de correlación de Pearson.

cd: Desviación estándar de los valores observados.

rd: Desviación estándar de los valores simulados.

cm: Promedio de los valores observados.

rm: Promedio de los valores de simulados.

Los rangos de ajuste de KGE no se encuentran definidos de forma clara para evaluar la eficiencia de la modelación a escala diaria, por lo que se adoptaron los rangos de ajuste del índice NSE (Tabla 3) puesto que ambos índices se encuentran relacionados.

Tabla 3. Valores Referenciales de Nash-Sutcliffe a escala diaria

NASH	AJUSTE
< 0,2	Insuficiente
0,2 – 0,4	Satisfactorio
0,4 – 0,6	Bueno
0,6 – 0,8	Muy Bueno
> 0,8	Excelente

Elaborado por: Crespo D, López T (2019)

Fuente: (SENAMHI, 2016)

3.4 Requerimientos de los modelos hidrológicos seleccionados

Para iniciar la simulación en los modelos hidrológicos es necesario contar con el siguiente tipo de información:

Tabla 4. Requerimientos de modelos hidrológicos

HEC-HMS	HBV- light
MDT (Modelo de elevación Digital)	MDT (Modelo de elevación Digital)
Red fluvial	Área de zonas de vegetación en porcentaje
Mapa de usos y tipo de suelo	Área de zonas de agua en porcentaje.
Base de datos diaria de: Precipitación, Temperatura y Caudal	Base de datos diaria de: Precipitación, Temperatura y Caudal

Elaborado por: Crespo D, López T (2019)

3.5 Información disponible

La subcuenca del Tomebamba ha sido monitoreada por el INAMHI (Instituto Nacional de Meteorología en Hidrología). Para la selección de las estaciones a emplearse en este estudio y al ser necesarios datos diarios de las variables de precipitación, temperatura y caudal se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones:

- No presenten inconsistencias o incongruencias en las bases de datos.
- Estaciones meteorológicas que preferiblemente se encuentren dentro de la subcuenca.

- Las estaciones seleccionadas pertenezcan a un mismo ente responsable.
- Porcentaje de datos vacíos mínimos en el período 1981-2015.

Finalmente, se seleccionaron cinco estaciones, tres meteorológicas distribuidas entre en la zona alta media y baja de la subcuenca y dos hidrológicas. Las cuales se detallan en la Tabla 5 y se representan en la Figura 5.

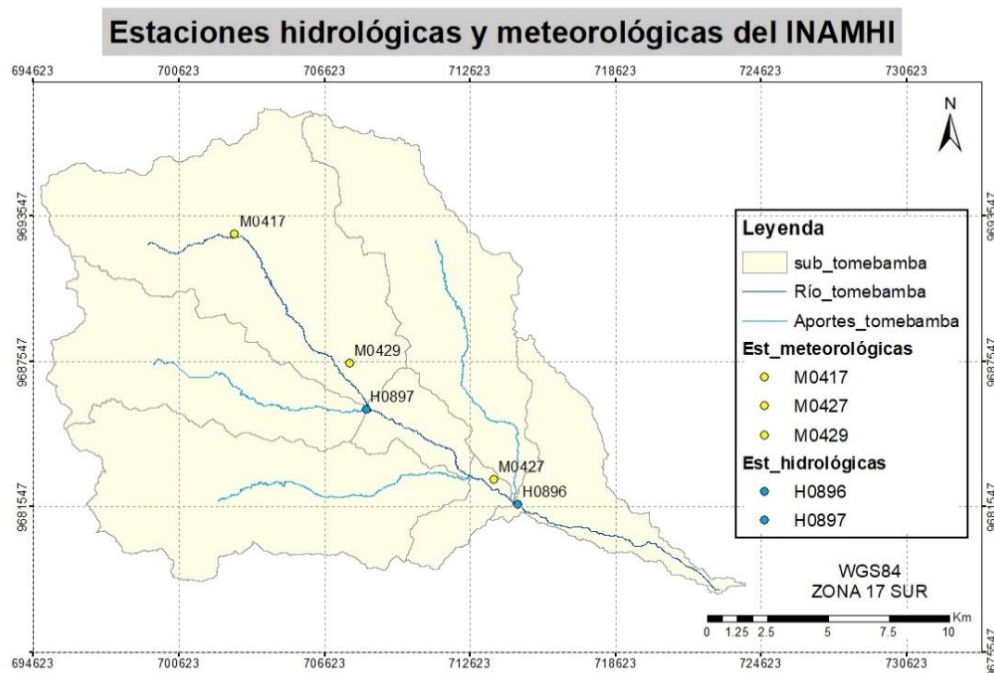
Tabla 5. Estaciones meteorológicas e hidrológicas del INAMHI

NOMBRE	TIPO	CODIGO	CORDENADAS		PERIODO DISPONIBLE
			X	Y	
Piscícola Chirimichay	Meteorológica	M0417	-78,9631805	-2,8593781	1981 – 2015
Sayausí Matadero Dj	Meteorológica	M0427	-79,07559204	-2,867628098	1981 – 2015
Surucucho Llulluchis	Meteorológica	M0429	-79,11647797	-2,840317011	1981 – 2015
Surucucho Aj Llulluchas	Hidrológica	H0897	-79,12333333	-2,8397222	1971 – 2015
Matadero en Sayausí	Hidrológica	H0896	-79,0670166	-2,875243902	1971 – 2015

Elaborado por: Crespo D, López T (2019)

Fuente: (INAMHI)

Figura 5. Ubicación de las estaciones hidrológicas y meteorológicas en la Subcuenca del Tomebamba



Elaborado por: Crespo D, López T (2019)

Fuente: (INAMHI)

3.5.1 Procesamiento de las series de precipitación, temperatura y caudal

Una vez que los datos de cada una de las estaciones involucradas fueron recopilados, se observó que existían intervalos de tiempo con datos faltantes, por lo que, se procedió con el relleno de datos ausentes de todas las series de tiempo desde 1981 a 2014 a escala diaria. Las estaciones a las cuales se aplicó la metodología de relleno de datos de precipitación se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6. Porcentaje de datos vacíos para las estaciones de precipitación.

Estación	Código	% Vacíos 1981-2014
Piscícola Chirimichay	M417	12%
Sayausí Matadero DJ	M0427	3%
Surucucho (Lullucchas)	M429	7%

Elaborado por: Crespo D, López T (2019)

Las estaciones meteorológicas de precipitación seleccionadas no poseen registro de temperatura a escala diaria, por lo que, se estimaron estos valores a partir del cálculo de la ecuación diaria de gradiente altitudinal. Esta ecuación hace referencia a la recta que representa el comportamiento del valor de temperatura con respecto a la altura, para lo cual, se emplearon a todas las estaciones meteorológicas que poseen el registro de temperatura, dado que no presentan incongruencias en su base de datos y el valor de temperatura no presenta la misma variabilidad que los valores de precipitación, por lo que se asume que podemos utilizar la información de diferentes entidades a cargo de estas estaciones (Longares, Novak, & Castillo, 2011; Sánchez Delgado, 2015). Las estaciones a las cuales se aplicó la metodología de relleno de datos de temperatura se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7. Porcentaje de datos vacíos para las estaciones de temperatura.

Estación	Código	% Vacíos 1981-2014
Huagrauma	Huag	96%
Llaviucu	Llavi	92%
Toreadora	Tore	94%
Labrado	M0141	3%
Chanlud	M1111	58%
Zhurucay	PLLM003	86%
Quimsacocha1	PLLM009	75%

Elaborado por: Crespo D, López T (2019)

- **Relleno de los datos de precipitación y temperatura**

Para el tratamiento de los datos de precipitación y temperatura se implementó la paquetería Climatol del software RStudio que contiene funciones para la homogeneización, control de calidad y relleno de datos ausentes. En breves rasgos, Climatol implementa un proceso iterativo para crea una serie ficticia estimando los datos en función de las estaciones alrededor. Posteriormente, compara la serie ficticia con los datos observados de la estación de origen y en base a las desviaciones estándar se puede considerar a un dato como una anomalía, entonces reemplaza el valor estimado por el observado como parte de la corrección de anomalías, homogenización y control de calidad. Este proceso se repite hasta que toda la serie analizada sea homogénea (Guijarro, 2018).

Esta metodología solo puede llevarse a cabo si por lo menos existe un registro en algunas de las estaciones meteorológicas, cuando esto es comprobado, se procede a realizar la normalización de los datos. De Luque (2011) y Guijarro (2018) recomiendan que para la precipitación la normalización por proporción respecto a la media es preferible, mientras que, para valores como temperatura se recomienda utilizar la estandarización como tal.

Ecuación 2. Normalización de datos a través de la división para la media.

$$x = X/m_x$$

Ecuación 3. Normalización a través de la estandarización.

$$x = (X - m_x)/s_x$$

Donde:

X : Serie de datos de precipitación o temperatura.

m_x : Valor de la media de una serie X .

s_x : Valor de la desviación estándar de una serie X .

Una vez realizado estos procesos, Climatol básicamente reconstruye una serie ficticia en el punto de cada estación. La serie ficticia se obtiene como promedio de los datos de las estaciones de alrededor ponderadas según la distancia, mediante la siguiente ecuación (Guijarro, 2018):

Ecuación 4. Obtención de la serie ficticia

$$y = \frac{\sum_{j=1}^{j=n} w_j x_j}{\sum_{j=1}^{j=n} w_j}$$

Donde y es el dato estimado a partir de los correspondientes n datos x_j más cercanos y w_j es el peso asignado a ellos.

A continuación, compara con la estación origen obteniendo una serie de anomalías que son las diferencias entre la serie con los datos originales y la serie ficticia reconstruida. Los pasos siguientes se realizan de forma iterativa hasta alcanzar valores estables, tomando como guía la metodología propuesta por De Luque Söllheim (2011) y consiste en:

1. Analizar los outliers o anomalías, las series de anomalías se estandarizan y en aquellas anomalías superiores a 5 veces (por defecto) la desviación estándar y se elimina el dato original.
2. Se aplica el Test Estándar de Homogeneidad Normal o SNHT en dos fases, la primera por sectores o ventanas (cada 120 datos) y la segunda en toda la serie de datos.

El Test Estándar de Homogeneidad Normal o SNHT es una prueba de razón de probabilidad ampliamente utilizada para detectar no homogeneidades en una serie de tiempo. El estadístico de prueba se usa para comparar la media de las primeras n observaciones con la media de las observaciones restantes ($n - d$) con n puntos de datos, este estadístico de prueba se determina por el valor T_d que se obtiene con la siguiente expresión (Ahmed, Shahid, Ismail, Nawaz, & Wang, 2018):

Ecuación 5. Test Estándar de Homogeneidad Normal (SNHT).

$$T_d = d\bar{z}_1^2 + (n - d)\bar{z}_2^2 \text{ para } d = 1, 2, \dots, n$$

donde:

$$\bar{z}_1 = \frac{1}{d} \sum$$

Y

$$\bar{z}_2 = \frac{1}{n - d} \sum_{i=d+1}^n \frac{(y_i - \bar{y})}{s}$$

Donde

y_i : Valor original

\bar{y} : Media

s: Desviación estándar de la serie.

Cuando todas las no homogeneidades por sectores o ventanas se han corregido por el proceso anterior, se vuelve a realizar el test SNHT a toda la serie. Cuando todas las no homogeneidades han sido por fin eliminadas, la etapa final, está dedicada nuevamente al cálculo de los datos que faltan (Guijarro, 2018).

Como un paso adicional, se estiman los valores de temperatura para las estaciones Piscícola Chirimichay, Sayausí Matadero DJ y Surucucho (Llullucchas) en base a la ecuación de la recta y considerando el gradiente térmico.

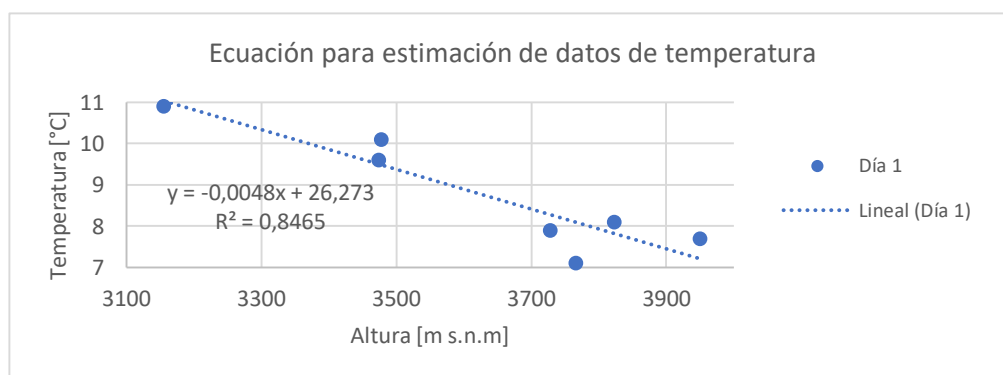
Por ejemplo, en la Tabla 8 se observan los valores de temperatura del día 1, obteniendo la ecuación de gradiente térmico para este día (Ver Figura 6) y al reemplazar el valor de la altura de las estaciones sin datos en la ecuación obtenida, se estima la temperatura para el día 1 de las estaciones de interés, tal como se observa en la Tabla 9.

Tabla 8. Valores de temperatura en el día 1

Nombre	Código	Altura (m s.n.m)	Día 1
Huagrauma	Huag	3823	8,1
Llaviucu	Llavi	3155	10,9
Toreadora	Tore	3950	7,7
Labrado	M0141	3478	10,1
Chanlud	M1111	3474	9,6
Zhurucay	PLLM003	3766	7,1
Quimsacocha1	PLLM009	3728	7,9

Elaborado por: Crespo D, López T (2019)

Figura 6. Ecuación de gradiente térmico para día 1



Elaborado por: Crespo D, López T (2019)

Tabla 9. Datos de temperatura estimados en las estaciones de interés en el día 1.

Nombre	Código	Altura (m s.n.m)	Día 1
Piscícola Chirimichay	M417	3505	9,449
Sayausí Matadero DJ	M0427	2795	12,857
Surucucho (Llulluchis)	M429	3400	9,953

Elaborado por: Crespo D, López T (2019)

Este proceso se repitió para cada uno de los días presentes en la serie temporal a escala diaria de 1981 a 2014.

- **Relleno de los datos de caudal**

Para el relleno de datos de caudal se aplicó una descomposición STL (acrónimo de "Descomposición estacional y de tendencias con Loess). Es un método versátil y robusto de identificación y reemplazo de valores atípicos y perdidos en una serie de tiempo. Para ello se aplicó la función `tsclean` perteneciente a la librería `forecast` del software RStudio (R. Cleveland, W. Cleveland, & Terpenning, 1990). Los porcentajes de vacíos en las estaciones hidrológicas se observan a continuación:

Tabla 10. Porcentaje de datos vacíos para las estaciones hidrológicas.

Estación	Código	% Vacíos 1981-2014
Matadero en Sayausí	H0896	8%
Surucucho Aj	H0897	13%

Elaborado por: Crespo D, López T (2019)

Este procedimiento se basa en realizar una descomposición STL aditiva a las series estacionales, entonces podemos representar dicha descomposición como (R. Cleveland et al., 1990):

$$y_t = S_t + T_t + R_t$$

Donde:

y_t : Son los datos.

S_t : Es el componente estacional.

T_t : Es el componente del ciclo de tendencia.

R_t : Es el componente restante o residuos.

t : Es todo en el periodo de tiempo.

Para estimar los valores faltantes y reemplazar los valores atípicos se elimina el componente de estacionalidad y se realiza una interpolación lineal en la serie. Una vez obtenida la serie ficticia se identifica los valores atípicos o anomalías utilizando la desviación estándar, si un valor sobrepasa el límite establecido de desviación estándar el valor original es reemplazado por el valor generado. Este proceso se realiza de forma iterativa hasta finalmente obtener la serie de datos más probables (R. Cleveland et al., 1990).

- **Método de interpolación IDW**

Para obtener los valores de precipitación y temperatura sobre toda la subcuenca se aplicó una interpolación IDW o inverso de la distancia ponderada. El proceso de interpolación se lo realizó para cada día desde 1981 a 2014 y fue aplicado únicamente para las estaciones meteorológicas descritas en la Tabla 5. Cada estación representa un punto de muestreo cuyas variables meteorológicas son ponderados durante la interpolación, así la influencia de cada punto con respecto a otro, disminuye conforme se incrementa la distancia entre ellos (Díaz et al., 2008).

Cada estación posee un peso en relación a su ubicación con respecto a otras estaciones y sobre el punto a estimar. Este se expresa como (Díaz et al., 2008):

Ecuación 6. Estimación del peso de una estación con respecto a la distancia.

$$W_i = \frac{N \left(\frac{1}{d_{e,i}}\right)^B}{\sum_{i=1}^N \left(\frac{1}{d_{e,i}}\right)^B}$$

Donde:

W_i : Peso de la estación.

N : Número total de estaciones.

$d_{e,i}$: Distancia entre el sitio a estimar e y la estación i .

β = Coeficiente de potencia.

El valor de la variable sobre un punto cualquiera de la subcuenca se estima con la siguiente ecuación (Díaz et al., 2008):

Ecuación 7. Estimación de una variable meteorológica según la interpolación IDW.

$$P_e = \sum_{i=1}^N W_i P_i$$



Donde:

P_e : Dato de las variables meteorológicas estimadas en un sitio e .

P_i : Dato de las variables meteorológicas medidas en la estación i .

W_i : Peso de la estación.

i : Representa el punto estimado en el sitio e .

N : Número de estaciones cercanas al sitio e , empleadas para estimar los datos de las variables meteorológica en el sitio e .

El resultado de la interpolación puede observarse en el Anexo 2. Finalmente, para estimar los valores de precipitación y temperatura para cada microcuenca se realizó un promedio.

3.5.2 Cálculo de la evapotranspiración potencial

Los datos de evapotranspiración potencial (ETp) se obtuvieron mediante el método de Thornthwaite, que fundamenta su metodología de cálculo en la temperatura media, la cual se corrige con la duración astronómica del sol y el número de días del mes. Este método es ampliamente usado en hidrología y cálculos de balance hídrico (Almorox, 2007).

Thornthwaite comprobó que la evapotranspiración es proporcional a la temperatura media afectada de un coeficiente exponencial y propone la fórmula (Almorox, 2007):

Ecuación 8. Estimación de la evapotranspiración en base a la temperatura.

$$e = 16 \left(\frac{10 * t}{I} \right)^a$$

Donde:

e : evapotranspiración mensual sin ajustar (mm/mes).

t : temperatura media mensual (°C) calculadas en base a los valores diarios de temperatura después de aplicar la interpolación IDW.

I : índice de calor anual, que se obtiene mediante la sumatoria de los doce índices de calor mensuales (Almorox, 2007):

Ecuación 9. Cálculo del índice de calor anual

$$i = \left(\frac{t}{5} \right)^{1,514}$$

a : parámetro que se obtiene en función de I mediante la siguiente expresión (Almorox, 2007):

Ecuación 10. Cálculo del parámetro a en función del índice de calor anual.

$$a = ((675 \times 10^{-9})I^3 - (771 \times 10^{-7})I^2 + (1792 \times 10^{-5})I + 0,49239)$$

Una vez que se ha obtenido el valor de la evapotranspiración en función de la temperatura se debe ajustar a través de un coeficiente que tome en cuenta el número de días de cada mes y las horas de luz de cada día en función de la latitud. Para ello se introduce el índice de iluminación que es el número máximo de horas de sol, dependiendo del mes y la latitud que se obtiene de las coordenadas donde está ubicada la estación de monitoreo. Se propone la siguiente fórmula (Almorox, 2007):

Ecuación 11. Evapotranspiración potencial por el método de Thornthwaite.

$$ETp = e * \left(\frac{N}{12}\right) \left(\frac{d}{30}\right)$$

Donde:

e: evapotranspiración mensual sin ajustar (mm/mes).

N: número máximo de horas de sol, en función del mes y la altitud (Ver

Anexo 1).

d: número de días del mes.

3.6 Implementación de los modelos hidrológicos seleccionados

En la presente investigación se realiza la modelación continua de la Subcuenca del río Tomebamba. A diferencia de la modelación de eventos en donde se simula un evento hidrológico definido que puede durar de minutos a varios días, en la modelación continua se implementan metodologías para representar la evolución de todo el proceso hidrológico a lo largo de varios años. En este, se representa la parte de la precipitación total que se pierde por evapotranspiración, genera escorrentía superficial, se infiltra y genera escorrentía sub-superficial o percola a capas más profundas (Feldman, 2000).

Adicional a la modelación continua, se analiza la respuesta de los modelos hidrológicos frente al cambio de uso de suelo y se determina si son capaces de reflejar su influencia en los resultados simulados, para ello se evaluó el comportamiento final del modelo hidrológico en dos versiones, en la primera versión se emplea el cambio de uso de suelo y en la segunda no se considera los cambios de uso de suelo a lo largo del tiempo.

3.6.1 Descripción del modelo hidrológico HEC-HMS

En este estudio se empleó la versión 4.3 del software HEC-HMS, diseñado por los ingenieros de las fuerzas armadas de Estados Unidos. HEC-HMS está constituido de 3 componentes principales, los cuales se detallan a continuación (Sánchez, 2017):

- Modelo de la Cuenca, en el que se introduce al programa cada una de las microcuencas presentes dentro de la zona de estudio y sus características, por ende, aquí se introducen los parámetros necesarios para realizar el modelamiento de los 4 módulos.
- Modelo Meteorológico, el modelo meteorológico utiliza datos de precipitaciones, evapotranspiración y los asigna a las diversas microcuencas.
- Especificaciones de control, en este componente se le indica al programa cuando empezar y cuando terminar de realizar los cálculos, además de determinar el incremento de tiempo para el modelamiento.

El modelo incluye herramientas para modelación continua como el método *Soil Moisture Accounting* (contabilidad de la humedad del suelo por su traducción del inglés) y modelación de eventos como el método del *Soil Conservation Service* o *SCS* (servicio de conservación de suelos por su traducción del inglés). Generalmente, en la simulación de eventos se considera únicamente los procesos a nivel superficial que generan escorrentía directa sin incluir las pérdidas, mientras que en la simulación continua se consideran los procesos en las capas inferiores del suelo que aportan al caudal total (Scharffenberg, Bartles, Brauer, Fleming, & Karlovits, 2018).

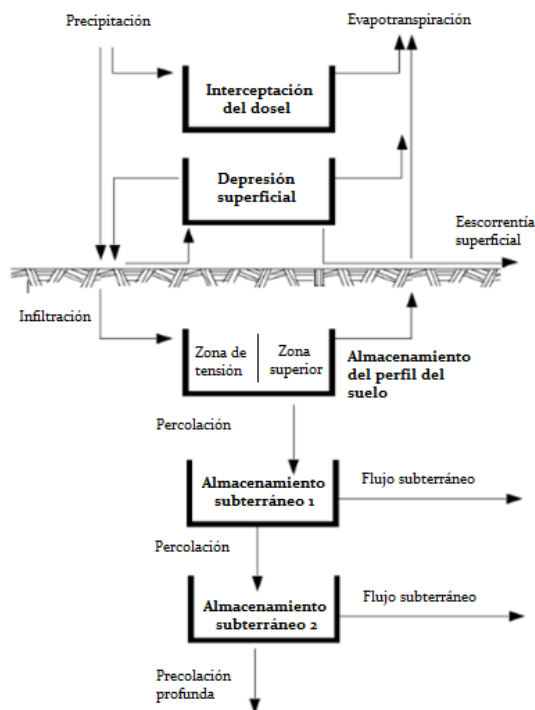
Con el propósito de seguir los criterios de la investigación, se procedió a realizar un modelo hidrológico de forma continua, el cual permita evaluar el comportamiento de la zona de estudio frente al posible cambio de uso de suelo. Tomando esto en consideración se optó por realizar una modelación híbrida, es decir, se realizó implementó el principio del número de curva del SCS dentro de la modelación continua *Soil Moisture Accounting*.

El método de número de curva tradicional, que generalmente se utiliza en modelación de eventos como simulación de tormentas o inundaciones, no toma en cuenta las pérdidas por evapotranspiración y el aporte del flujo sub-superficial al caudal total, los cuales son los parámetros afectados por el cambio de uso de suelo y que representan la modelación continua (Feldman, 2000).

Soil Moisture Accounting considera 5 secciones en donde la precipitación es retenida o almacenada, estas son: la vegetación, superficie, suelo, acuífero superficial 1 y por último un acuífero 2 a nivel más profundo. El proceso inicia con la precipitación que cae sobre la superficie de la cuenca. Parte de la misma es interceptada por arbustos, árboles y pastos que al impedir que el agua alcance la superficie del suelo, regresa a la atmosfera por evaporación. El agua que no es retenida por la vegetación desciende por las ramas, tallos o troncos hasta la superficie terrestre, en donde se une con la precipitación que cayó directamente sobre la superficie. En esta etapa, el agua puede quedarse estancada sobre la superficie y evaporarse o puede infiltrarse y permanecer almacenada temporalmente en las capas superiores parcialmente saturadas del suelo; si el volumen almacenado excede la capacidad máxima establecida, contribuirá al caudal total como escorrentía superficial. El agua infiltrada que no retorna a la superficie, se mueve horizontalmente como flujo intermedio dentro del suelo, donde puede ser aprovechada por las raíces de plantas, contribuir al caudal total como flujo sub-superficial o percolar verticalmente al acuífero subterráneo. El agua en el acuífero se mueve lentamente, pero eventualmente, puede retornar a los cauces como flujo base (Scharffenberg et al., 2018; Feldman, 2000).

El proceso descrito anteriormente se esquematiza a continuación:

Figura 7. Esquema del método de Soil Moisture Accounting



Fuente: (U.S. Army Corps of Engineers, 2000)

HEC-HMS cuenta con 4 módulos o etapas de simulación: pérdidas, transformación, flujo base y tránsito de flujo, las cuales se describen a continuación:

- **Módulo de pérdidas**

Las metodologías empleadas en el módulo de pérdidas separan la porción de precipitación que genera escorrentía de la precipitación total (Sánchez, 2008). En este módulo se emplean tres metodologías el método de dosel, método de superficie y método de pérdidas, las cuales se describen a continuación (Scharffenberg et al., 2018; Feldman, 2000):

La primera conocida como el método de dosel estima el comportamiento de la zona de estudio, en su capacidad de interceptar la precipitación por presencia de vegetación y su capacidad de evapotranspirar. En el método de superficie se calcula la parte de la precipitación que puede quedar retenida en la superficie debido a zonas impermeables o en surcos y es propensa a infiltrarse o evaporarse.

Finalmente, en el método de pérdidas se estima la parte de la precipitación que se infiltra. En éste, se implementó el de número de curva del SCS. Con este método el programa calcula la precipitación incremental durante un evento mediante la re-calculación del volumen de infiltración al final de cada intervalo de tiempo. El número de curva que se utilice debe representar las diferentes combinaciones de los grupos y usos de suelo de la zona de estudio.

Así mismo, dentro del módulo de pérdidas se puede incluir la abstracción inicial que es un parámetro que define la porción de lluvia que no contribuya a la escorrentía superficial e incluir el porcentaje de zonas de impermeabilidad.

- **Módulo de transformación**

El módulo de transformación se emplea para determinar el comportamiento de la zona de estudio al momento de generar escorrentía superficial debido a la precipitación neta o efectiva, considerando el tiempo que toma esta precipitación en llegar al punto de salida de la subcuenca. Para ello, se utilizó el método de hidrograma unitario del SCS, el mismo que representa la transformación de la precipitación neta o efectiva en escorrentía, para lo cual utiliza como parámetro de ingreso el tiempo de retardo (Sánchez, 2008).

El método del hidrograma unitario estima el gasto máximo de escurrimiento del cauce principal en un tiempo de concentración propio del cauce. Los estudios realizados por el

SCS encontraron que en general el tiempo de retardo (tiempo en que se presenta el gasto máximo del hidrograma), se puede aproximar obteniendo el 60% del tiempo de concentración, tiempo que requiere el modelo para la simulación (Zapata, 2014).

La precipitación neta o efectiva se define como la fracción de la precipitación total que ha generado escorrentía y se convierte en caudal aportante para la subcuenca mediante flujo superficial y sub-superficial, debido a que no es retenida en la superficie o absorbida por la vegetación presente en el terreno. Para su obtención se consideran otras pérdidas de precipitación producto de las características de la zona, por lo que se determina como la diferencia entre la precipitación total, la evapotranspiración y las pérdidas (Chow, Maidment, & Mays, 1988):

Ecuación 12. Precipitación neta

$$PN = P - ETP - O$$

Donde:

PN: Es la precipitación neta o efectiva expresado en mm.

P: Precipitación total en mm

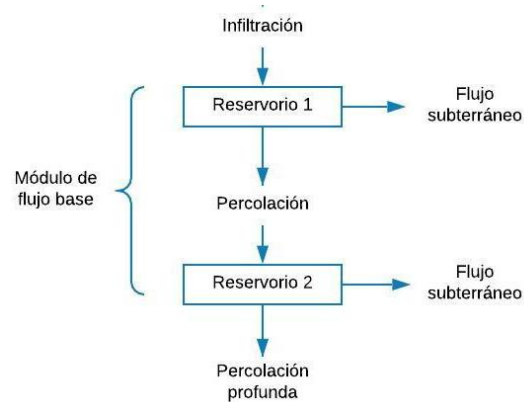
ETP: Es el valor de la evapotranspiración expresado en mm.

O: Es el valor de otras pérdidas de precipitación producto de las características de la zona.

- **Módulo de flujo base**

Estima el agua subterránea poco profunda que contribuye al flujo de la corriente durante un evento de precipitación. Para el cálculo de flujo base se empleó una adaptación de la metodología de reservorio lineal de HEC-HMS. Esta divide el reservorio en dos secciones, la primera capa superficial (reservorio 1), recibe el agua de la percolación poco profunda del suelo, el agua en esta capa genera escorrentía subterránea o percola hacia el reservorio 2 donde el agua puede contribuir a la escorrentía subterránea o percolar a capas más profundas (Ver Figura 8) (Feldman, 2000; Sánchez, 2008).

Figura 8. Esquema original del reservorio lineal



Fuente: (Feldman, 2000)

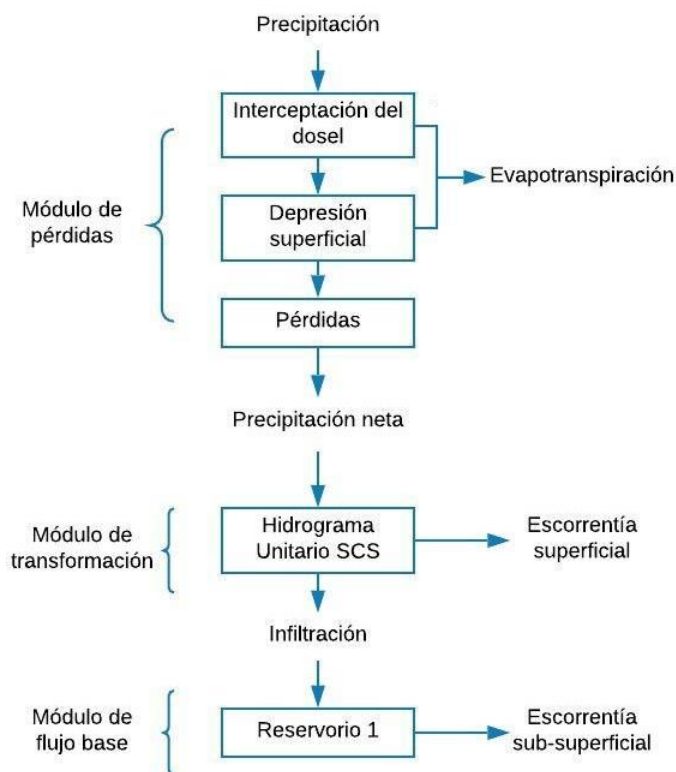
Debido a que no existen acuíferos de ningún tipo en la subcuenca del Tomebamba, se empleó el módulo de flujo base para emular los procesos horizontales del flujo bajo el suelo, de esta forma el flujo sub-superficial se emula en la primea capa de este módulo (reservorio 1) y se elimina la segunda capa profunda (reservorio 2), que generalmente, se implementaría en el caso de que la zona de estudio presente acuíferos profundos (Bennett, 1998).

- **Módulo de tránsito de flujo**

En este módulo se estima la evolución del hidrograma a medida que fluye a lo largo de un cauce a través de un depósito o embalse. En este estudio no fue necesario representar ningún tipo de tránsito a través de canales o cauces.

El esquema propuesto para la modelación híbrida se detalla en la Figura 9 a continuación:

Figura 9. Esquema de modelación híbrida aplicada en HEC-HMS



Elaborado por: Crespo D, López T (2019)

En HEC-HMS se realiza una modelación semidistribuida, es decir los datos meteorológicos son ingresados para cada microcuenca a escala diaria. La simulación híbrida une las metodologías del número de curva e hidrograma unitario del SCS para estimar la escorrentía superficial con la metodología *Soil Moisture Accounting* que estima las pérdidas producto de la evapotranspiración, pérdidas por las características de la superficie de la zona de estudio y la escorrentía generada por el flujo sub-superficial con la finalidad de simular la respuesta hidrológica de la subcuenca del río Tomebamba (Sánchez, 2008).

3.6.1.1 Descripción de los parámetros de entrada en HEC-HMS

Para proceder con la simulación el modelo necesita de 12 parámetros (Ver Tabla 11), a excepción de la evapotranspiración, número de curva e impermeabilidad, los 9 parámetros restantes fueron calibrados manualmente con el objetivo de obtener mayor similitud entre los caudales simulados y observados.

Tabla 11. Datos requeridos para cada etapa de la modelación hidrológica en HEC-HMS

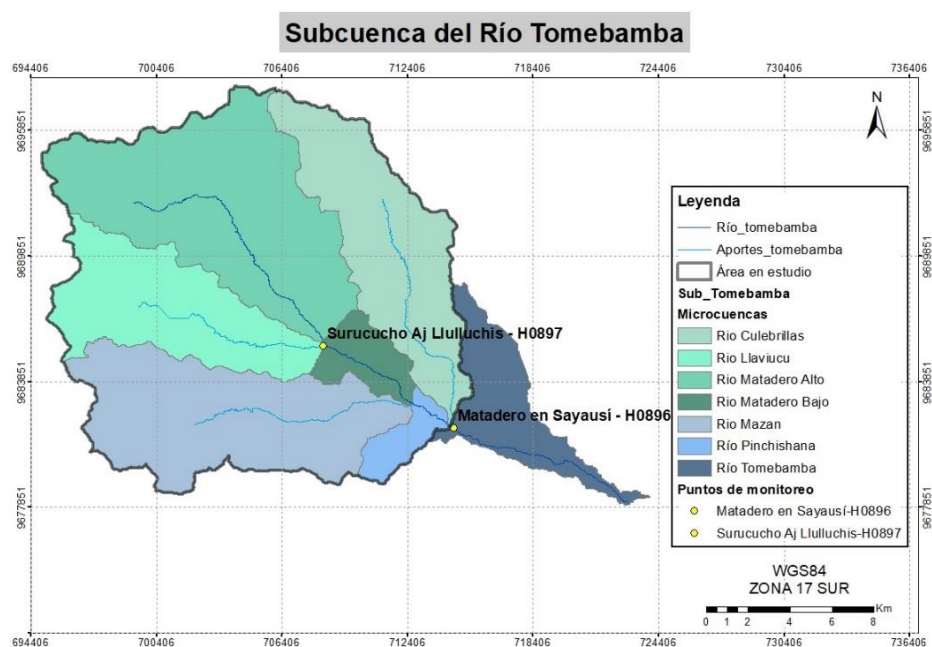
Método	Parámetros	Unidad	Descripción	Límite
<i>Módulo de pérdidas</i>				
Dosel	Almacenamiento inicial	%	Es el porcentaje del almacenamiento máximo del dosel que está lleno de agua al inicio de la simulación.	0 – 100
	Almacenamiento máximo	mm	Es la capacidad máxima de intercepción de precipitación por parte del dosel.	≥ 0
	Evapotranspiración	-	Indica que el agua se evapora desde el almacenamiento en los periodos secos o en los periodos secos y húmedos.	-
Superficie	Almacenamiento inicial	%	Es el porcentaje del almacenamiento máximo de la superficie que está lleno de agua al inicio de la simulación.	0 – 100
	Almacenamiento máximo	mm	Es la capacidad máxima de intercepción de precipitación por parte de la superficie del suelo.	≥ 0
Pérdidas	Abstracción inicial	mm	Cantidad de precipitación que debe caer antes de que se produzca escorrentía superficial.	≥ 0
	Número de Curva		Es un parámetro empírico que estima el volumen de infiltración a través de un número hidrológico durante un evento.	0,01 – 99,99
	Impermeabilidad	%	Representa el porcentaje de área impermeable respecto del área total de la subcuenca.	0 – 100
<i>Módulo de transformación</i>				
Hidrograma unitario del SCS	Tiempo de retardo	min	Es la diferencia de tiempo entre el centro de gravedad de hietograma de la precipitación neta o efectiva y la punta del hidrograma (gasto máximo).	>0
	Tiempo de concentración	min	Es el tiempo que tarda en finalizar el escurrimiento total en el territorio generado por la precipitación a nivel superficial.	>0
<i>Módulo de flujo Base</i>				
Reservorio lineal	Agua subterránea inicial 1	m ³ /s	Se refiere al flujo de agua sub-superficial que ya existe en la zona al inicio de la simulación.	≥ 0
	Coeficiente de agua subterránea 1	hr	Representa el tiempo en horas que demora en llegar una gota de agua a la salida de la subcuenca a nivel sub-superficial, considerando de forma hipotética que se encuentra en el punto más alejado.	>0

Elaborado por: Crespo D, López T (2019)
Fuente: (Scharffenberg et al., 2018; Feldman, 2000)

3.6.1.2 Calibración y validación

Debido a la ubicación de los puntos de monitoreo, correspondientes a las estaciones hidrológicas Surucucho antes de la junta con Llulluchas, y la de Matadero en Sayausí, el área a calibrar y validar en el presente estudio es 298,28 km² que corresponde a la suma de las áreas de todas las microcuencas a excepción de la microcuenca del Tomebamba. A pesar de no incluir un punto de monitoreo para esta última microcuenca, los valores para esta también son estimados. La ubicación geográfica de las estaciones y el área sujeta a estudio se pueden observar en la Figura 10.

Figura 10. División de la subcuenca del río Tomebamba para la modelación en HEC-HMS



Elaborado por: Crespo D, López T (2019)

Con el objetivo de incluir la variación en la cobertura vegetal y determinar su influencia sobre el caudal simulado por el programa, se tomó un periodo de 5 años para la calibración, mientras que la validación fue dividida en cuatro periodos de acuerdo a la información disponible sobre cobertura vegetal. Los periodos de calibración y validación se describen a continuación:

Tabla 12. Periodos de modelación considerando la cobertura vegetal

Etapa	Fecha		Año de cobertura vegetal
	Inicio	Fin	
Calibración	01 de enero de 1985	31 de diciembre de 1990	1990
Validación	01 de enero de 1991	31 de diciembre de 1994	1990
Validación	01 de enero de 1995	31 de diciembre de 2003	2000
Validación	01 de enero de 2004	31 de diciembre de 2010	2008
Validación	01 de enero de 2011	31 de diciembre de 2014	2014

Elaborado por: Crespo D, López T (2019)

El periodo de calentamiento es empleado para estabilizar el comportamiento de la cuenca y de esta manera se elimina un comportamiento inicial erróneo, por lo tanto, se recomienda siempre establecer un periodo de calentamiento en la simulación. Este periodo puede ser de un lapso de tiempo mínimo de 3 meses, pero para esta investigación se determinó un periodo de calentamiento de 1 año antes de cada uno de los periodos de calibración y validación establecidos (Cabrera, 2017).

3.6.1.2.1 Estimación de los parámetros requeridos por HEC-HMS

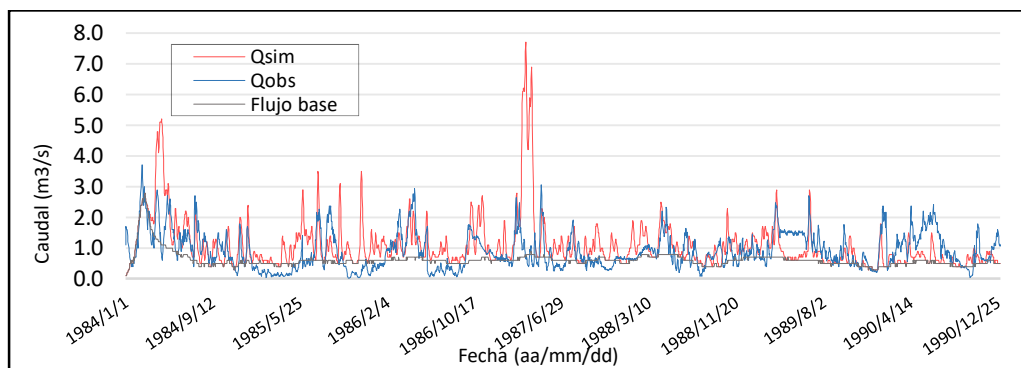
Para obtener valores de eficiencia altos, la subcuenca mediante calibración automática, adopta valores de parámetros que no coinciden con las características propias de una cuenca andina. Para evitar esos errores se realizó una calibración manual tomando en cuenta los siguientes criterios:

- Parámetros dentro de los rangos relativamente normales para una cuenca andina.
- Mayor similitud en el pico máximo de descarga dentro del período de calibración entre los datos simulados y observados.
- El flujo base representa entre el 60% y 70% del flujo total simulado (Cabrera, 2017).
- Similitud entre volumen total de agua producido por la subcuenca entre los datos simulados y observados.
- Eliminar valores de descarga iguales a 0 m³/s en los datos simulados.

Es importante señalar que durante la calibración manual se encontró que los parámetros que determinan el estado inicial de la subcuenca de estudio, es decir, el almacenamiento inicial en el dosel, el almacenamiento inicial en la superficie y el agua subterránea inicial 1 no influyen en la modelación continua, claro está, una vez se supera el período de calentamiento. Para explicar esto se observa la Figura 11 en la que el primer trimestre de

simulación, el flujo total de la subcuenca posee el mismo valor del flujo base (que representa el flujo sub-superficial), este error se produce por las condiciones iniciales de la subcuenca, por lo que, es necesario establecer un período de calentamiento.

Figura 11. Simulación hidrológica en la estación Surucucho incluyendo el período de calentamiento en HEC-HMS.



Elaborado por: Crespo D, López T (2019)

En base a lo descrito anteriormente se obtuvieron los siguientes valores:

3.6.1.2.2 Módulo pérdidas

3.6.1.2.2.1 Dosel

- **Almacenamiento inicial**

Su valor se considera irrelevante en la zona de estudio debido a que una vez pasado el periodo de calentamiento no influye en el volumen del caudal simulado independientemente del valor ingresado al programa. Por ello se asignó el valor mínimo posible de 0 % para todas las microcuencas.

- **Almacenamiento máximo**

Este valor se lo estimó mediante calibración manual y se lo fijó al valor de 0,01 mm para todas las microcuencas.

- **Evapotranspiración**

Este parámetro es necesario para indicar al programa los periodos secos y húmedos y así emplea los valores de evapotranspiración introducidos al modelo meteorológico.

3.6.1.2.2.2 Superficie

- **Almacenamiento inicial**

Su valor se considera irrelevante en la zona de estudio debido a que una vez pasado el periodo de calentamiento no presenta variaciones en el modelo hidrológico independientemente del valor ingresado al programa. Por ello se asignó el valor mínimo posible de 0 % para todas las microcuencas.

- **Almacenamiento máximo**

Este valor se estimó mediante calibración manual y se lo fijó al valor de 0,80 mm para todas las microcuencas.

3.6.1.2.2.3 Pérdidas

- **Abstracciones iniciales**

Este valor fue calculado mediante calibración manual y se designó un valor fijo de 0,8 mm para todas las microcuencas.

- **Número de curva**

El número de curva es un parámetro empírico que se calcula con el método desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos (SCS) actualmente Servicio de Conservación de los Recursos Naturales (NRCS) de los EEUU. Toma en cuenta las condiciones de humedad antecedente del suelo (seco, normal y húmedo). El método fue desarrollado partiendo de los registros de lluvia y escorrentía en 24 horas, por lo tanto, no evalúa la variación temporal de la escorrentía. Se representa mediante un número adimensional en curvas estandarizadas que varían entre 0 y 100. En donde 0 significa que no existe escurrimiento por lo tanto toda la precipitación se infiltra y 100 que es impermeable por lo que toda la precipitación generará escorrentía (Havrylenko, Damiano, & Pizarro, 2012).

El número de curva se puede estimar empleando solamente la información de uso de suelo o cobertura vegetal y del tipo de suelo o textura de suelo. (Havrylenko, Damiano, & Pizarro, 2012). Para esto, fue necesario reclasificar los mapas de textura de suelo presentes en la zona de estudio en 4 grupos hidrológicos, las cuales van desde la A hasta la D de forma secuencial (Ibañez, Moreno, & Gisbert, 2017). Para este caso se implementó la clasificación de la Tabla 13, establecida oficialmente por el SCS del USDA.

Tabla 13. Equivalencias entre las clases de textura del USDA y los grupos hidrológicos.

Textura	Grupo hidrológico
Arenosa (Ar)	A
Arenoso.franca (Ar-F)	A ¹ - B
Arcillosa (a)	C ¹ – D
Arcillo-arenosa (a-Ar)	C ¹
Arcillo.limosa (a-L)	C ¹
Franca (F)	A ¹ – B ¹ – C
Franco-arenosa (F-Ar)	A ¹ – B
Franco-arcillosa (F-a)	C
Franco-arcillo-arenosa (F-a-Ar)	B ¹ - C
Franco-arcillo-limosa (F-a-L)	C
Franco-limosa (F-L)	A ¹ – B ¹ - C
Limosa (L)	B ¹

¹Suelos con buenos agregados, baja densidad aparente y/o más del 35% de fragmentos rocosos.

Fuente: (Cammeraat, Cerdà, & Imeson, 2010)

A continuación, se describen los grupos hidrológicos del suelo propuestos por el SCS (Cammeraat et al., 2010; Diaz & Mercado, 2017):

Grupo A: Representan suelos con bajo potencial de escurrimiento consisten principalmente de arenas o gravas profundas. Este tipo de suelos poseen un alto potencial de infiltración, por lo tanto, una baja capacidad para generar escorrentía.

Grupo B: Son suelos cuya capacidad infiltración cuando están completamente mojados es moderada, al igual que su capacidad para generar escorrentía. Estos suelos poseen texturas moderadamente finas a moderadamente gruesas.

Grupo C: Generalmente este tipo de suelos posee una capa que impide el movimiento descendente del agua por lo que la velocidad de transmisión del agua es lenta. Así mismo, su textura es moderadamente fina a fina y la capacidad de generación de escorrentía es moderadamente alta cuando estos suelos se encuentran completamente húmedos

Grupo D: Los suelos correspondientes a este grupo hidrológico presentan un alto potencial de escorrentía y una baja infiltración. Las texturas son arcillosas, el nivel freático es alto o son suelos poco profundos, asentados sobre material impermeable.

A continuación, se muestra la reclasificación de las texturas de suelo y grupos hidrológicos para la zona de estudio:

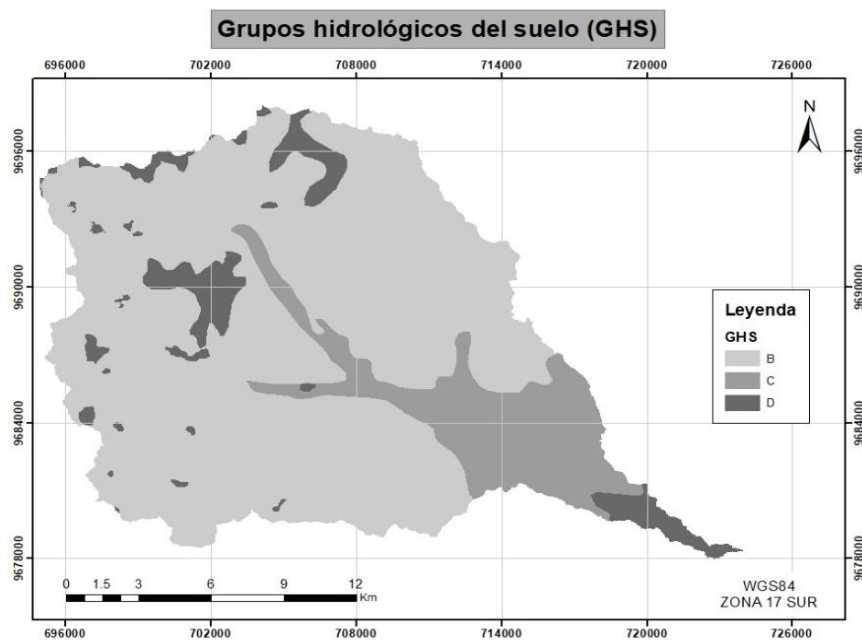
Tabla 14. Reclasificación de textura del suelo.

Características del suelo en la subcuenca			Clasificación SCS
Tipo de suelo	Subclase	Textura	
Eriales o afloramientos rocosos	-	-	D
Área urbana	-	-	D
Cuerpo de agua	-	-	D
Inceptisol	Andepts	Pseudo-limoso y moderadamente gruesa.	B
Alfisol	Udalfs	Arcilloso y moderadamente gruesa a fina.	C
Mollisol	Udolls	Arcillo-arenoso y fina	C
Vertisol	Usters	Arcilloso y fina	C

Elaborado por: Crespo D, López T (2019)

La clasificación de cuerpo de agua, área urbana y eriales o afloramientos rocosos fue asignada como “D” por ser zonas poco permeables con alta capacidad de escorrentía.

Figura 12. Mapa de los grupos hidrológicos del suelo



Elaborado por: Crespo D, López T (2019)

Así mismo, se reclasificó los usos de suelo en la zona de estudio en base a la tabla de usos de suelo propuesta por el SCS para Estados Unidos (Ver Tabla 15) de la siguiente forma.

A todo lo que sea agua se le dio una calificación de “1”, a la cobertura relacionada con medio residencial y los afloramientos rocosos una calificación de “2”, a los bosques y páramo una calificación de “3” y a los cultivos una calificación “4” (Ver Tabla 16).

Tabla 15. Reclasificación de usos de Suelo SCS.

Clasificación original		Reclasificación	
Número	Descripción	Número	Descripción
11	Agua a cielo abierto	1	Agua
90	Humedales leñosos		
95	Humedales herbáceos emergentes		
21	Poblados en espacios abiertos	2	Residencial
22	Poblados de baja intensidad		
23	Poblados de mediana densidad		
24	Poblados de alta densidad		
41	Bosques secos	3	Bosque
42	Bosques verdes		
43	Bosques mixtos		
31	Tierra fértil	4	Agricultura
52	Arbustos/matorrales		
71	Pastizales/herbáceas		
81	Pasto/heno		
82	Cultivos		

Fuente: (Cammaraat et al, 2010)

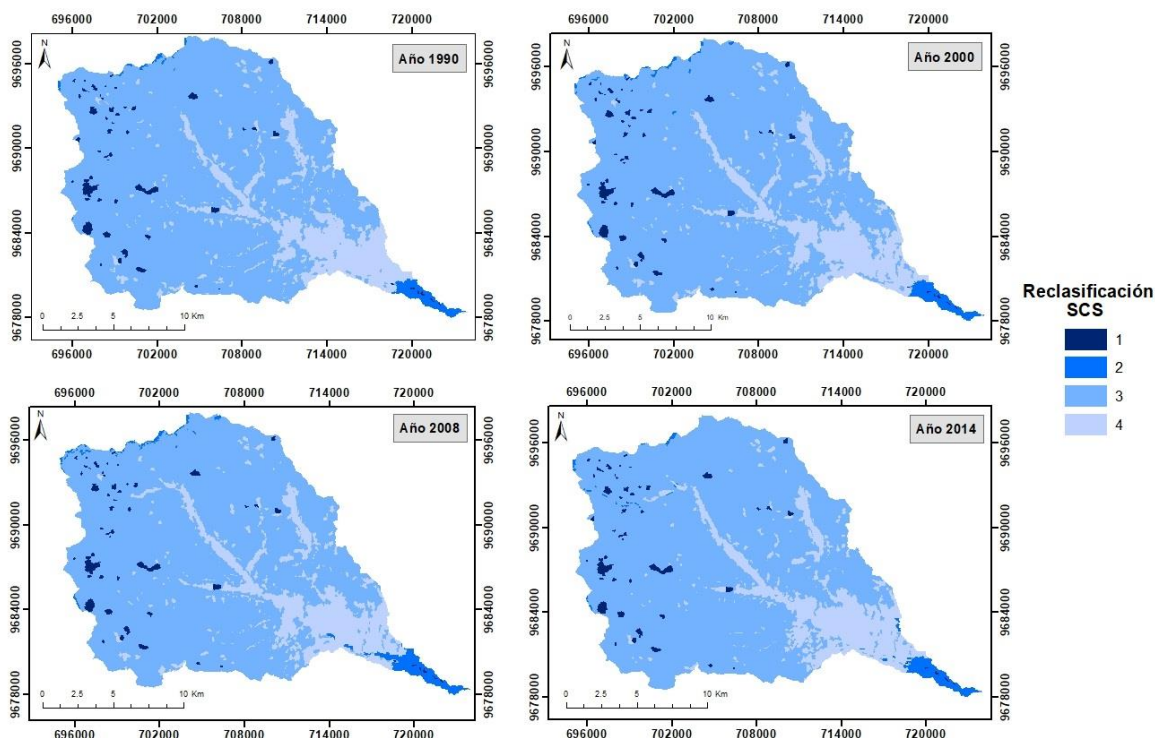
En base a lo anterior, los resultados obtenidos para la subcuenca del Río Tomebamba pueden observarse en la Tabla 16 y la Figura 13:

Tabla 16. Clasificación de uso del suelo o cobertura vegetal.

Cobertura/Uso	Clasificación SCS
Vegetación arbustiva y herbácea	4
Erial o afloramiento rocoso	2
Cuerpos de agua	1
Páramo	3
Tierra agropecuaria	4
Zona antrópica	2
Bosque nativo	3
Plantación forestal	3

Elaborado por: Crespo D, López T (2019)

Figura 13. Mapa de la distribución del uso del suelo según la reclasificación del SCS



Elaborado por: Crespo D, López T (2019)

A continuación, con los valores reclasificados del tipo de suelo y uso de suelo se selecciona el número de curva correspondiente de la siguiente tabla propuesta por el SCS:

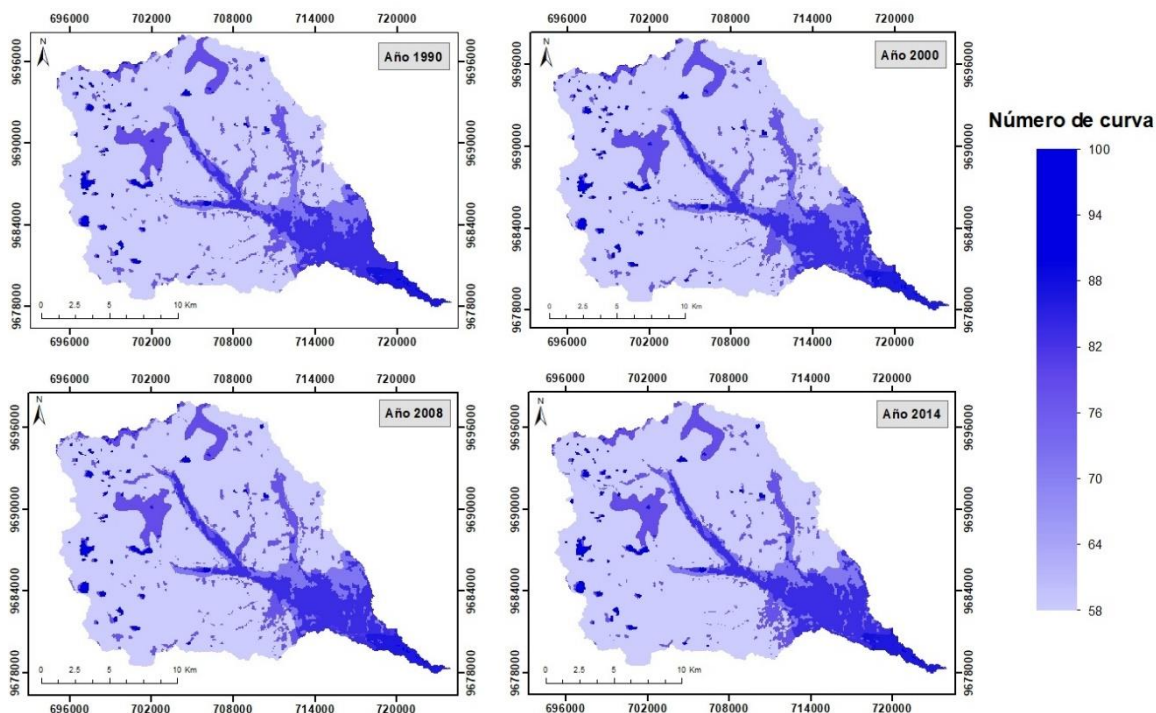
Tabla 17. Valor del número de curva según intersección de uso de suelo reclasificado y textura de suelo reclasificada.

Valor de uso de suelo	Descripción	A	B	C	D
1	Agua	100	100	100	100
2	Medio residencial	57	72	81	86
3	Bosque	30	58	71	78
4	Agricultura	67	77	83	87

Fuente: (Cammeraat et al., 2010)

El resultado de la determinación del número de curva se puede observar en la Figura 14:

Figura 14. Valor del número de curva tomando considerando la variación de la cobertura vegetal



Elaborado por: Crespo D, López T (2019)

En HEC-HMS el número de curva debe ingresarse por cada una de las microcuencas, para obtener estos valores se debe aplicar un promedio espacial del número de curva para cada una de las microcuencas, es otras palabras, se realizó un promedio ponderado considerando la extensión que ocupa cada uno de los valores de número de curva dentro de cada microcuenca. Los valores del número de curva para cada microcuenca se muestran en la Tabla 18.

Cabe resaltar que, como se cuenta con 4 diferentes usos de suelo correspondientes a los años 1990, 2000, 2008 y 2014, se obtuvieron 4 valores de número de curva para cada una de las microcuencas. Esto quiere decir que se asume que la textura de suelo de la zona permanece constante, pero existe una variación en la cobertura vegetal que afecta la capacidad de generación de escorrentía. A lo largo de tiempo se observa una disminución en la capacidad de infiltración en la zona (a excepción de las microcuencas de Mazán, Llaviucu y Matadero Alto) debido al cambio de uso de suelo y al aumento de zonas impermeables. Los bosques y vegetación natural favorecen el proceso de retención de agua e infiltración, por el contrario, las formaciones rocosas, zonas urbanas y zonas agrícolas (dependiendo las prácticas de manejo del suelo) tienden a aumentar la escorrentía

superficial debido a la compactación e impermeabilización de los suelos (Díaz & Mercado, 2017). Los valores más bajos del número de curva se encuentran en los sectores con mayor porcentaje de páramo debido su alta capacidad de retención de agua, por el contrario, zonas con asentamientos humanos y cultivos tienen valores más altos del número de curva.

Tabla 18. Número de curva correspondiente a cada una de las microcuencas considerando el paso de tiempo.

ID	Microcuenca Nombre	Número de curva - 1990	Número de curva - 2000	Número de curva - 2008	Número de curva - 2014
1	Río Matadero Alto	62,91	62,95	63,17	62,83
2	Río Culebrillas	63,36	63,54	63,54	63,45
3	Río Llaviucu	62,35	62,29	62,22	62,11
4	Río Matadero Bajo	70,49	70,77	70,82	71,01
5	Río Mazán	59,98	59,94	60,04	59,83
6	Río Pichishana	68,85	69,26	70,13	71,13
7	Río Tomebamba	78,79	78,35	78,70	79,08

Elaborado por: Crespo D, López T (2019)

• Impermeabilidad

A este parámetro se le otorgó un valor de 0 debido a que en el área de estudio estas zonas son totalmente impermeables y se consideran al momento de establecer el valor del número de curva.

3.6.1.2.3 Módulo de transformación

• Tiempo de retardo

Existen diferentes metodologías para su obtención entre los que se encuentran los modelos de Kirpich y Temez, en el cual, este parámetro se calcula en base al tiempo de concentración. Aunque en un inicio los valores iniciales fueron estimados mediante las fórmulas a continuación (Scharffenberg et al., 2018), se optó por realizar una calibración manual. Los valores obtenidos se observan en la Tabla 19.

Ecuación 13. Ecuación de Temez para el cálculo del tiempo de concentración.

$$Temez : T_c = 0,3 * \left(\frac{L}{i^{0,25}} \right)^{0,76}$$

Ecuación 14. Ecuación de Kirpich para el cálculo del tiempo de retardo.

$$Kirpich: T_{lag} = 0,6 * T_c$$

Donde:

Tc: Tiempo de concentración

L: Longitud del cauce principal (km)

i: Pendiente media de la subcuenca (m/m^3)

Tlag: Tiempo de retardo (min)

Tabla 19. Tiempo de retardo de cada microcuenca obtenido mediante calibración manual

Microcuenca		Tiempo de	Tiempo de	Tiempo de	Tiempo de
ID	Nombre	retraso (min)	retraso (min)	retraso (min)	retraso (min)
		1990	2000	2008	2014
1	Río Matadero Alto	5946,52	5943,07	5921,65	5954,07
2	Río Culebrillas	5904,33	5887,50	5887,89	5895,97
3	Río Llaviucu	6000,00	6005,73	6012,29	6022,61
4	Río Matadero Bajo	5306,73	5286,28	5282,32	5267,89
5	Río Mazán	6236,91	6241,54	6230,16	6252,64
6	Río Pinchishana	5433,29	5401,26	5334,27	5259,30
7	Río Tomebamba	4747,70	4774,33	4753,26	4730,33

Elaborado por: Crespo D, López T (2019)

3.6.1.2.4 Módulo de flujo Base

- **Agua subterránea inicial 1**

Este valor se considera irrelevante debido a que no presenta variaciones en el modelo hidrológico una vez que se pasa el periodo de calentamiento independientemente del valor ingresado al programa, por ello se asignó el valor mínimo posible de $0 \text{ m}^3/\text{s}$ para todas las microcuencas.

- **Coeficiente de agua subterránea 1**

Para la presente metodología de modelación, este parámetro emula al tiempo de retraso del flujo sub-superficial. Este valor se estimó realizando la calibración manual en cada microcuenca que compone la zona de estudio y se presenta en la tabla a continuación:

Tabla 20. Coeficiente de agua subterránea correspondiente a cada una de las microcuencas

Microcuenca		Coeficiente de agua subterránea 1 (hr) - 1990	Coeficiente de agua subterránea 1 (hr) - 2000	Coeficiente de agua subterránea 1 (hr) - 2008	Coeficiente de agua subterránea 1 (hr) - 2014
ID	Nombre				
1	Río Matadero Alto	991,09	990,51	986,94	992,34
2	Río Culebrillas	984,06	981,25	981,32	982,66
3	Río Llaviuco	1000,00	1000,95	1002,05	1003,77
4	Río Matadero Bajo	884,46	881,05	880,39	877,98
5	Río Mazán	1039,48	1040,26	1038,36	1042,11
6	Río Pinchisana	905,55	900,21	889,05	876,55
7	Río Tomebamba	791,28	795,72	792,21	788,39

Elaborado por: Crespo D, López T (2019)

3.6.2 Descripción del modelo hidrológico HBV-light

En este estudio se utilizó el modelo HBV-light que fue desarrollado por el Instituto Meteorológico e Hidrológico de Suecia y tiene como objetivo estudiar y analizar el comportamiento de una cuenca. Para ello emplea datos de precipitación, temperatura, caudal y evapotranspiración como parámetros de entrada los cuales deben ser ingresados como archivos matriciales en formato texto (.txt) (Vasco, & Antonio, 2016). Adicionalmente, este modelo emplea un periodo de calentamiento que denomina “warming up” el cual resulta necesario para el comienzo de la simulación, puesto que permite obtener los valores iniciales apropiados de variables como la humedad del suelo y los caudales, las simulaciones durante el período de calentamiento no se almacenan ni se utilizan para ningún análisis posterior (Seibert, 2005).

HBV- light se fundamenta en una modelación a través de 4 módulos principales que representan características específicas de los procesos que se generan en la cuenca para obtener escorrentía, estos son: deshielo y acumulación de nieve; precipitación efectiva y humedad del suelo; la respuesta de escorrentía y finalmente el enrutamiento (Vasco, & Antonio, 2016).

- **Módulo de nieve**

Representa los procesos de acumulación de nieve y deshielo. Para ello considera un valor umbral de temperatura, por debajo del cual, la precipitación se acumula como nieve; por el contrario, si la temperatura ambiente se encuentra por encima del umbral se inicia el deshielo. Este proceso está representado por la siguiente ecuación (Bergström, 1992):

Ecuación 15. Estimación del deshielo en HBV-light

$$MELT = C_{MELT} \cdot (T - TT)$$

Donde:

MELT: Deshielo (mm/día)

CMELT: Factor grado-día (mm °C⁻¹ día)

TT: Umbral de Temperatura (°C)

T: Temperatura media diaria (°C).

Este módulo no fue empleado en este estudio debido a las condiciones climáticas de la zona y a que no presenta registros de nieve relevantes, por lo tanto, para los parámetros de este módulo se asignaron valores de cero.

- **Módulo de humedad del suelo**

Cuando la precipitación llega a la subcuenca se divide en dos partes, la primera es la cantidad de agua que llena el reservorio de humedad del suelo y la segunda es la porción de agua que infiltra o sirve como recarga a los reservorios subterráneos. Esta última es estimada por el modelo en función del contenido de humedad del suelo (SM) durante la precipitación y el máximo almacenamiento de humedad del suelo (FC). En la siguiente ecuación se detalla el cálculo de la infiltración efectiva (Ruiz, 2017):

Ecuación 16. Cálculo de la infiltración efectiva

$$inf = \left(\frac{SM}{FC} \right)^{BETA} (P)$$

Donde:

inf: Infiltración efectiva.

BETA: Parámetro del modelo (Coeficiente de forma).

P: Precipitación diaria.

SM: Valor de humedad de suelo (mm).

FC: Capacidad máxima de almacenamiento del suelo (mm).

Mientras el contenido de humedad del suelo (SM) se aproxime cada vez más a la capacidad de almacenamiento del suelo (FC), la infiltración se reducirá y la contribución de la precipitación a la escorrentía será directa (Bergström, 1992).

La evapotranspiración actual se estima en base al almacenamiento del agua y es igual a la evapotranspiración potencial si $SM/FC > LP$, en caso de que $SM/FC < LP$ se utiliza una reducción lineal. Este proceso se representa mediante la siguiente expresión (Ruiz, 2017):

Ecuación 17. Estimación de la evapotranspiración actual en HBV-light.

$$E_{act} = E_{pot} \left(\frac{SM}{FC \cdot LP} \right)$$

Donde:

E_{act} : Evapotranspiración actual

E_{pot} : Evapotranspiración potencial

SM: Humedad de suelo (mm).

FC: Capacidad de almacenamiento (mm).

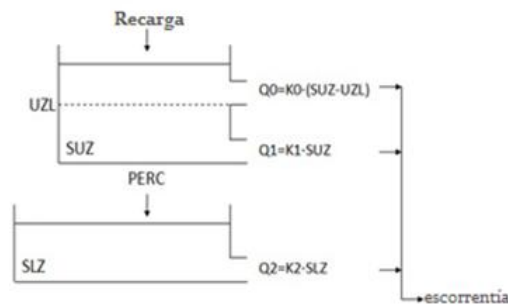
LP: Humedad del suelo por encima de la cual ET_{act} alcanza ET_{pot} .

- **Módulo de respuesta de la escorrentía**

Este módulo se encarga de estimar la escorrentía en la salida de la cuenca. Para ello, considera dos reservorios de almacenamiento (Figura 15) interconectados mediante percolación constante. El reservorio superior modela el flujo próximo a la superficie (flujo rápido) y el flujo sub-superficial (interflujo) por lo que tendrá dos salidas (Q_0 y Q_1), mientras que el reservorio inferior hace referencia al flujo que aporta el agua subterránea (flujo base) y posee una salida (Q_2). Los caudales están controlados por los coeficientes de recesión K_0 , K_1 y K_2 los cuales representan las funciones de respuesta de los depósitos. Finalmente, la escorrentía total se compone por la suma de Q_0 , Q_1 y Q_2 (Seibert, 2005).

La respuesta hidrológica requerida por la zona de estudio se encuentra representada por el flujo superficial y sub-superficial, despreciando el aporte de agua subterránea. Por ello, se asignaron valores de cero a los parámetros PERC y K_2 .

Figura 15. Estructura estándar del modelo HBV- light



Fuente: Seibert (2005)

Recarga: Entrada de la rutina del suelo [mm / Δt]

SUZ: Almacenamiento en la zona superior del suelo [mm]

SLZ: Almacenamiento en la zona inferior del suelo [mm]

UZL: parámetro umbral [mm]

PERC: percolación máxima a la zona inferior del suelo [mm / Δt]

K_i : Coeficiente de recesión [$1 / \Delta t$]

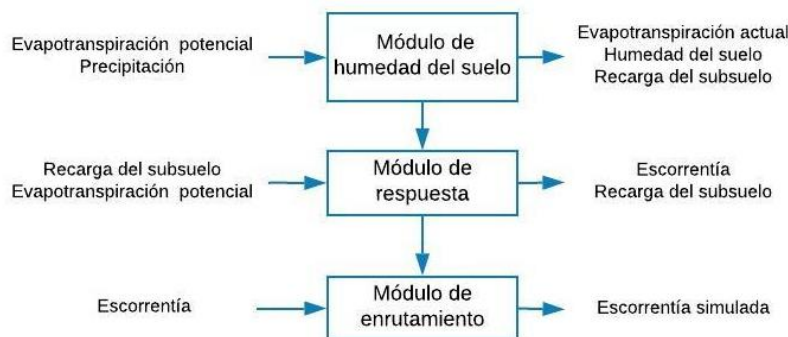
Q_i : Componente de escorrentía [mm/ Δt]

- **Módulo de enrutamiento**

En este módulo se emplea una función de transformación que tiene por objeto alisar del flujo generado mediante un único parámetro de peso denominado Maxbass. Este parámetro representa la duración de la escorrentía generada hasta el punto de salida (Seibert, 2005).

El esquema propuesto para la modelación en HBV-light se detalla a continuación:

Figura 16. Esquema de modelación aplicada en HBV-light



Fuente: Seibert (2005)

3.6.2.1 Descripción de los parámetros de entrada requeridos por HBV- light

El modelo HBV presenta 14 parámetros de los cuales 6 pertenecen al módulo de nieve que se relacionan al aporte de nieve de la zona, debido a que en la subcuenca no existen estos aportes y se desprecia el reservorio de almacenamiento inferior, únicamente se consideran 7 parámetros que pueden variar en un determinado rango y se encuentran asociados a los procesos de lluvia, escorrentía e infiltración (Astorayame, 2017). Estos parámetros se detallan a continuación:

Tabla 21. Parámetros de entrada del modelo hidrológico HBV- light.

PARÁMETRO	UNIDAD	DESCRIPCIÓN	LIMITES
Módulo humedad del suelo			
FC	mm	Es la máxima capacidad de almacenamiento del suelo, por lo tanto, a menor valor de este parámetro menor capacidad de retención de agua va a tener el suelo y aumentará la escorrentía.	0 – ∞
LP	-	Valor de humedad del suelo por encima del cual la evaporación actual alcanza la evaporación potencial.	0 – 1
BETA	-	Controla el aporte de la función de respuesta. Cuanto menor es su valor mayor es la filtración al nivel sub-superficial.	0 – ∞
Módulo de respuesta de la escorrentía			
UZL	mm/día	Volumen límite de almacenamiento a la celda sub-superficial.	0 – ∞
K0	día ⁻¹	Constantes de recesión que regulan la descarga rápida.	0 – 1
K1	día ⁻¹	Constantes de recesión que regulan la descarga lenta.	
Módulo de enrutamiento			
MAXBAS	día	Define el tiempo base de la función de distribución, es decir, el número de días de la rutina de transformación. A menor valor de MAXBAS se presentan picos, este parámetro influye en la forma más no en el volumen de la hidrógrafa.	1 – 100

Elaborado por: Crespo D, López T (2019)
Fuente: (Seibert, 2005; Astorayame, 2017)

3.6.2.1.1 Cálculo de las zonas de elevación, vegetación y cuerpos de agua

En HBV-light es necesario realizar la configuración de las propiedades de la subcuenca, para ello fue necesario ingresar los datos de las zonas de elevación, vegetación y cuerpos de agua. Se estableció una única zona de elevación que corresponde a la altura promedio del área de estudio (3690 m s. n. m.).

Los tipos de cobertura vegetal se agruparon en 3 zonas de vegetación que es el número máximo que permite establecer el programa. Debido a que el área para la calibración y validación se dividió en dos secciones (Ver Figura 17), a continuación, se detalla la agrupación de las áreas correspondientes a las zonas de vegetación y cuerpos de agua para la microcuenca 1 (Tabla 22) y para la microcuenca 2 (Tabla 23):

Tabla 22 . Zonas de vegetación y cuerpos de agua en la microcuenca 1.

Usos de suelo	Zona de vegetación	Área Año 1996		Área Año 2000		Área Año 2008		Área Año 2014	
		(Km2)	(%)	(Km2)	(%)	(Km2)	(%)	(Km2)	(%)
Bosque nativo	ZONA 1	2,97	5,8	3,48	6,8	3,60	7	3,70	7,2
Páramo									
Vegetación arborescente y herbácea	ZONA 2	44,92	87,6	44,35	86,5	44,36	86,5	44,34	86,5
Erial									
Tierra agropecuaria	ZONA 3	1,44	2,8	1,53	3	1,47	2,9	1,33	2,6
Cuerpos de agua (lagunas)		1,95	3,8	1,91	3,7	1,85	3,6	1,91	3,7

Elaborado por: Crespo D, López T (2019)

Tabla 23. Zonas de vegetación y cuerpos de agua en la microcuenca 2.

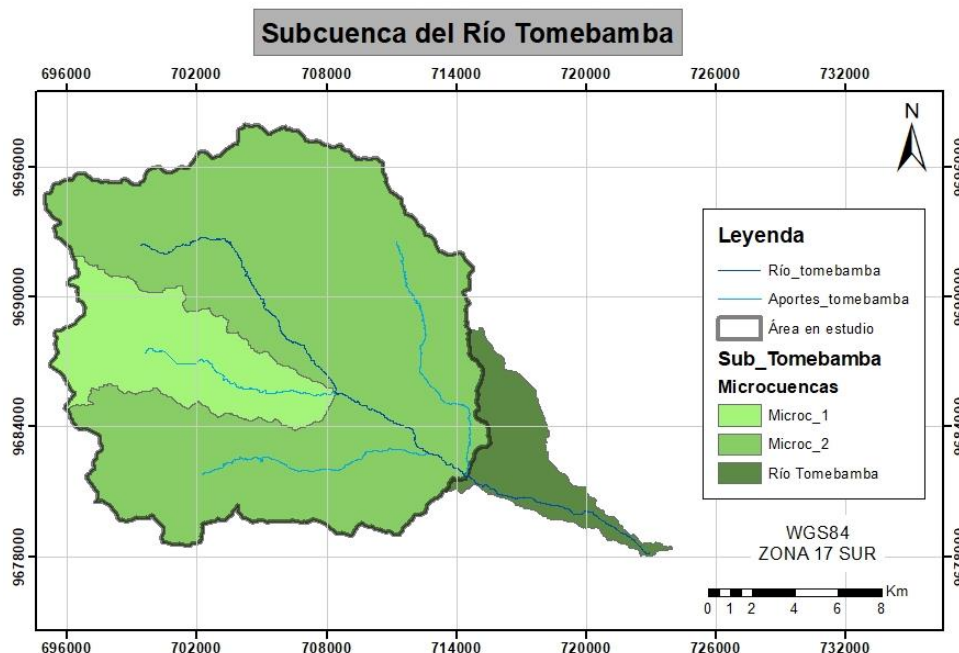
Usos de suelo	Zona de vegetación	Área Año 1996		Área Año 2000		Área Año 2008		Área Año 2014	
		(Km2)	(%)	(Km2)	(%)	(Km2)	(%)	(Km2)	(%)
Bosque nativo	ZONA 1	18,03	7,3	19,32	7,8	18,95	7,7	17,76	7,2
Plantación forestal									
Páramo	ZONA 2	208,01	84,2	202,99	82,2	201,07	81,4	200,92	81,3
Vegetación arborescente y herbácea									
Erial	ZONA 3	18,28	7,4	21,96	8,9	24,26	9,8	25,57	10,4
Tierra agropecuaria									
Cuerpos de agua (lagunas)	-	2,72	1,1	2,77	1,1	2,77	1,1	2,79	1,1

Elaborado por: Crespo D, López T (2019)

3.6.2.2 Calibración y validación

Para la calibración y validación en HBV-light, se dividió el área de estudio en dos microcuencas. La primera microcuenca está conformada por Llaviuco y la segunda microcuenca por la sumatoria de las áreas de las microcuencas Matadero Alto, Culebrillas, Matadero Bajo, Mazán y Pinchishana (Ver Figura 17).

Figura 17. División de la subcuenca del río Tomebamba para la modelación en HBV-light.



Elaborado por: Crespo D, López T (2019)

Los resultados obtenidos mediante la calibración automática en HBV- light mostraron ser adecuados, por ello, se optó por la calibración de Monte Carlo. Los rangos utilizados para esta etapa se basaron en el estudio realizado por Sucozhañay (2018), ya que estos rangos describen el comportamiento de una microcuenca de páramo fueron ampliados para que representen las características de la zona en estudio. A pesar de ello, fue necesario realizar un ajuste manual a los valores ya calibrados con el objetivo de cumplir con los 4 criterios establecidos en la calibración manual de HEC-HMS. Igualmente, es necesario incluir un periodo de calentamiento, siendo este de 1 año.

Los rangos de tiempo para la calibración y validación fueron distribuidos de la misma forma que en HEC-HMS, descritos en la Tabla 12. Los rangos utilizados para Monte Carlo se

detallan en la Tabla 24, conjuntamente con los valores ya calibrados utilizados en este estudio.

Tabla 24. Límites de calibración para Monte Carlo y parámetros calibrados para HBV-light

Límites de calibración			Valores calibrados			
Parámetro	Inferior	Superior		ZV1	ZV2	ZV3
Módulo de humedad del suelo						
FC	200	400	M1	291,700	387,879	260,811
			M2	399,409	283,508	330,540
LP	0,5	1	M1	0,794	0,501	0,861
			M2	0,839	0,995	0,939
BETA	1	3	M1	0,713	0,235	0,739
			M2	2,332	1,057	1,573
Módulo de respuesta de la escorrentía						
UZL	0	30	M1		5,000	
			M2		3,976	
K0	0,5	0,999	M1		0,772	
			M2		0,988	
K1	0,3	0,999	M1		0,139	
			M2		0,771	
Módulo de enrutamiento						
MAXBAS	2	15	M1		9,303	
			M2		4,856	

ZV1: Zona de vegetación 1, ZV2: Zona de Vegetación 2, ZV3: Zona de vegetación 3, M1: Microcuenca 1, M2: Microcuenca 2.

Elaborado por: Crespo D, López T (2019)

Fuente: Sucozhañay (2018)

3.7 Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad es definido como el estudio de la relación entre los resultados del modelo y los datos de ingreso del modelo. Es decir, determina la influencia de cada parámetro requerido en la modelación hidrológica y como su variación afecta el resultado de la simulación. Gracias al análisis de sensibilidad se puede obtener un mejor rendimiento del programa de modelación, debido a que se puede identificar que parámetros tienen mayor o menor influencia sobre la información resultante, por ende, es posible definir los parámetros que deben ser estimados con mayor exactitud y simplificar el modelo (Wallach, Makowski, Jones, & Brun, 2019).

En el presente estudio, se pretende definir el grado de dependencia de los parámetros más representativos y su influencia sobre el hidrograma simulado por cada modelo hidrológico. Por tanto, se aplicó un análisis de sensibilidad local, en el cual, un parámetro es alterado mientras que los otros permanecen constantes (Ibarra et al., 2016). El intervalo de variación

para todos los parámetros fue definido de forma porcentual, siendo 1 (100%) el valor real, es decir, el valor ya calibrado y validado. En base a este valor se calculó el 25%, 50%, 75%, 125%, 150% y 200% del mismo, para completar el rango de análisis de cada parámetro. La Tabla 25 y Tabla 26 detallan los intervalos de variación de cada parámetro y el valor resultante para HEC-HMS y HBV-light.

El periodo comprendido para el análisis fue establecido en 8 años, desde 1996 hasta 2004. Para evaluar los hidrogramas simulados y su variación, se aplicó un análisis estadístico en el que se determina cuantitativamente las diferencias entre los hidrogramas registrados y estimados. Los hidrogramas registrados se definen como la representación del caudal a través del tiempo, utilizando los parámetros calibrados sin alteración; al contrario, los hidrogramas estimados representan al caudal simulado aplicando la variación de cada uno de los parámetros (Li et al., 2019). Posteriormente, se realizó una representación gráfica de los caudales registrados frente a los rangos de variación de los parámetros. Para el análisis estadístico se calculó el error medio cuadrático (EMC) y el sesgo (PBIAS) mediante la librería HydroGOF de Rstudio. De forma general, estas mediciones permiten establecer la precisión de la simulación, definida como el grado de correspondencia de dos series de variables, en este caso, entre el caudal registrado y el caudal estimado (Jiang, Liu, Li, Liu, & Wang, 2015). A continuación, se describen estas medidas:

Error medio cuadrático (EMC): Calcula las diferencias cuadráticas entre las observaciones registradas y las estimadas, entonces calcula el promedio de dichos valores. Entre mayor sea el EMC menos preciso será el modelo; jamás podrá ser negativo, pero podrá alcanzar un valor de cero. Al ser sensible a valores atípicos, es muy útil cuando se desea prestar atención a alteraciones entre los valores de las observaciones (Drakos, 2018; Makridakis, 1995).

Ecuación 18. Error medio cuadrático (EMC).

$$EMC = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (S_t - O_t)^2$$

S_t : Observaciones registradas en la serie de tiempo.

O_t : Observaciones estimadas en la serie de tiempo.

N : Número de observaciones disponible.



Sesgo (PBIAS): Mide la tendencia de los valores estimados y si estos son mayores o menores que los valores registrados. Similar a EMC, entre más cercano a cero mejor es el modelo; por otra parte, valores positivos indican una tendencia de sobreestimación, mientras que, valores negativos indican una subestimación en la tendencia (Yapo, Gupta, & Sorooshian, 1996).

Ecuación 19. Sesgo (PBIAS).

$$PBIAS = 100 \frac{\sum_{i=1}^N (S_i - O_i)}{\sum_{i=1}^N (O_i)}$$

S_i: Observaciones registradas en la serie de tiempo.

O_i: Observaciones estimadas en la serie de tiempo.

Tabla 25. Parámetros del modelo HEC-HMS

Variación %	Número de curva	Tiempo de retardo	Coefficiente de agua subterránea 1	Almacenamiento Máximo-Superficie	Almacenamiento Máximo- ET
(-) 75	15,57	1501,43	250,24	0,2	0,0025
(-) 50	31,15	3002,87	500,48	0,4	0,005
(-) 25	46,72	4504,30	750,71	0,6	0,0075
100	62,29	6005,73	1000,95	0,8	0,01
(+) 25	77,86	7507,16	1251,19	1	0,0125
(+) 50	93,44	9008,60	1501,43	1,2	0,015
(+) 75	-	10510,03	1751,66	1,4	0,0175
(+) 100	-	12011,46	2001,90	1,6	0,02

Elaborado por: Crespo D, López T (2019)

Tabla 26. Parámetros del modelo HBV-light

Variación %	FC_ZV1	FC_ZV2	FC_ZV3	LP_ZV1	LP_ZV2	LP_ZV3	BETA_ZV1	BETA_ZV2	BETA_ZV3	UZL	K0	K1	MAXBAS
(-) 75	218,77	290,91	195,61	0,20	0,13	0,22	0,71	0,06	0,18	1,25	0,19	0,03	2,33
(-) 50	145,85	193,94	130,41	0,40	0,25	0,43	0,71	0,12	0,37	2,50	0,39	0,07	4,65
(-) 25	72,92	96,97	65,20	0,60	0,38	0,65	0,71	0,18	0,55	3,75	0,58	0,10	6,98
100	291,70	387,88	260,81	0,79	0,50	0,86	0,71	0,24	0,74	5,00	0,77	0,14	9,30
(+) 25	364,62	484,85	326,01	0,99	0,63	1,08	0,89	0,29	0,92	6,25	0,96	0,17	11,63
(+) 50	437,55	581,82	391,22	1,19	0,75	1,29	1,07	0,35	1,11	7,50	1,16	0,21	13,95
(+) 75	510,47	678,79	456,42	1,39	0,88	1,51	1,25	0,41	1,29	8,75	1,35	0,24	16,28
(+) 100	583,40	775,76	521,62	1,59	1,00	1,72	1,43	0,47	1,48	10,00	1,54	0,28	18,61

ZV1: Zona de vegetación 1, ZV2: Zona de Vegetación 2, ZV3: Zona de vegetación 3

Elaborado por: Crespo D, López T (2019)

4. RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados obtenidos por HEC-HMS y HBV-light en cada uno de los puntos de muestro. La Tabla 27 y Tabla 29 muestran los valores del índice de eficiencia KGE para el periodo de calibración y los periodos de validación respectivamente.

Para facilitar la interpretación de los datos simulados y comprobar la validez de los modelos hidrológicos, se realizaron tres tipos de gráficas con la información obtenida. Primero, un hidrograma en donde se representan los caudales simulados y observados. En este se puede determinar de forma visual el modelo que mejor representa el comportamiento hidrológico de la subcuenca y la calidad de la modelación. Segundo, una gráfica de dispersión entre el caudal modelado (eje Y) y el caudal observado (eje X) para determinar la fuerza de relación entre las variables mediante el coeficiente de correlación de Pearson (r) y evaluar la capacidad de reproducción del caudal simulado a través del coeficiente de determinación (R^2). Finalmente, una gráfica del balance de agua representado por el caudal simulado acumulado y observado acumulado; entre más semejantes sean, habrá un mejor balance. Igualmente, a través del cálculo del sesgo se hará evidente la sobreestimación o subestimación del caudal simulado.

4.1 Resultados de la calibración

Los valores obtenidos para KGE en HEC-HMS y HBV-light durante la calibración se detallan en la Tabla 27. Se puede observar que en ambos programas los valores fluctúan entre $< 0,2$ y $0,4$ que según los valores referenciales de Nash-Sutcliffe (Tabla 3) se encuentran entre insuficiente y satisfactorio. En general, en la estación de Matadero se obtuvieron valores de KGE más altos que en la estación de Surucucho y a pesar de que los resultados en ambos programas entran dentro del mismo rango de valores referenciales, HBV-light muestra un mejor rendimiento en la etapa de calibración para Surucucho y HEC-HMS para Matadero.

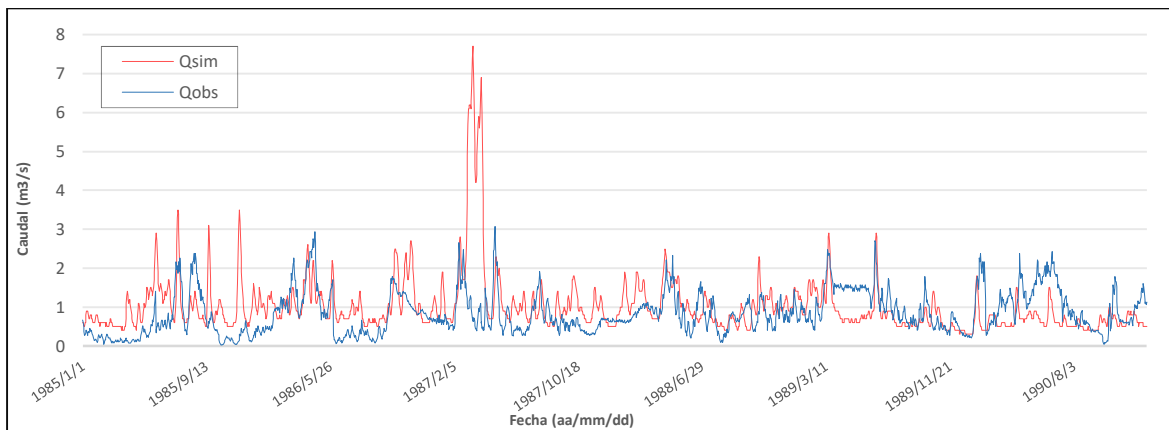
Tabla 27. Valores de los índices de eficiencia en el periodo de calibración en HEC-HMS y HBV-light

Punto de monitoreo	Periodo	Índice de eficiencia KGE			
		HEC_HMS		HBV-light	
Estación Surucucho	1985-1990	0,07	<i>Insuficiente</i>	0,14	<i>Insuficiente</i>
Estación Matadero		0,39	<i>Satisfactorio</i>	0,3	<i>Satisfactorio</i>

Elaborado por: Crespo D, López T (2019)

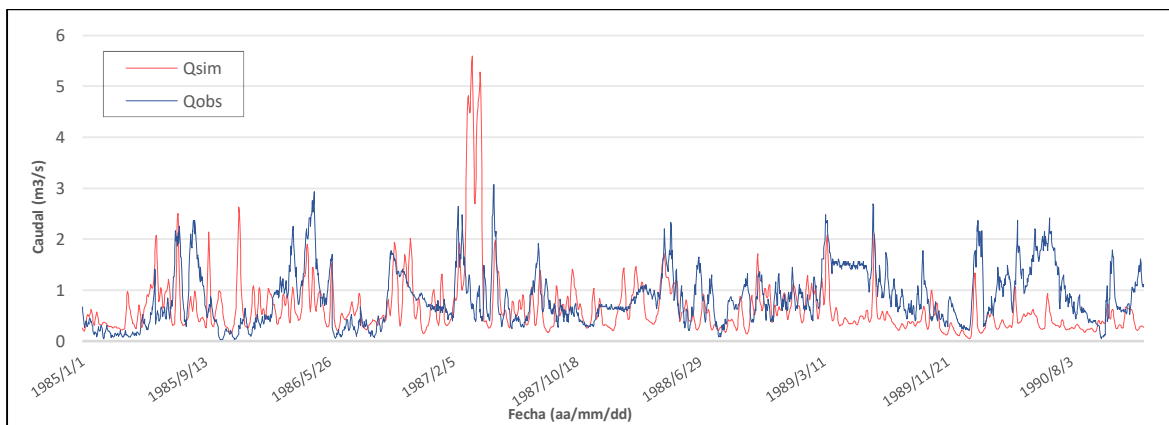
Los hidrogramas para Surucucho, representados por la Figura 18 y la Figura 19, muestran que HBV-light presenta un mejor ajuste a la forma del caudal observado en comparación con HEC-HMS, a excepción del periodo entre mediados de 1989 hasta finales de 1990. Para Matadero sucede lo contrario, en vista de que los caudales simulados por HEC-HMS (Ver Figura 20) tienen un mejor ajuste visual que en HBV-light (Ver Figura 21). HEC-HMS tiende a generar picos más altos, independientemente de que logre o no ajustarse al caudal observado.

Figura 18. Hidrograma de caudales simulados y observados en HEC-HMS durante la calibración en Surucucho



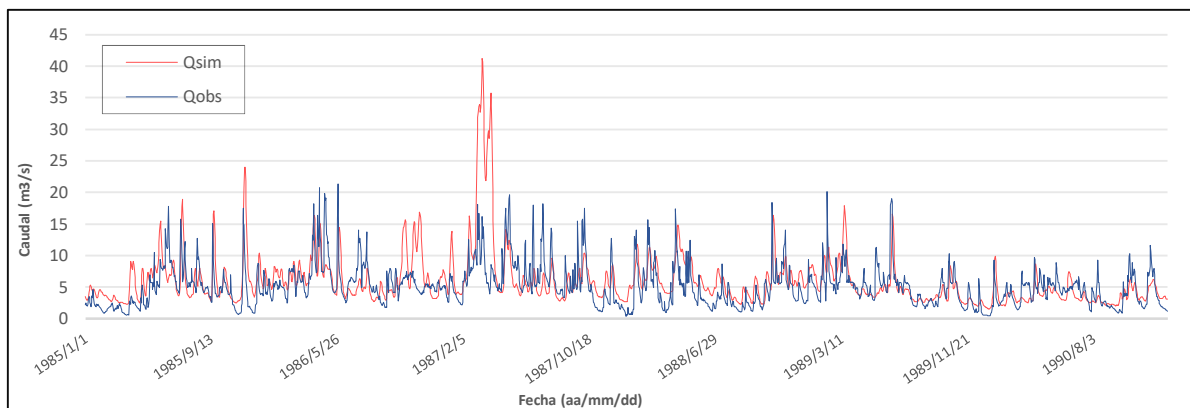
Elaborado por: Crespo D, López T (2019)

Figura 19. Hidrograma de caudales simulados y observados en HBV-light durante la calibración en Surucucho



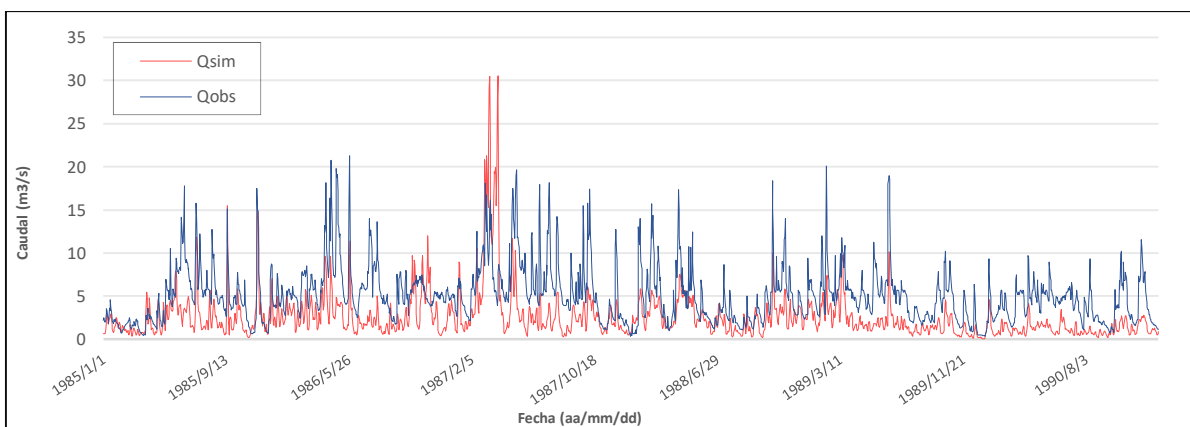
Elaborado por: Crespo D, López T (2019)

Figura 20. Hidrograma de caudales simulados y observados en HEC-HMS durante la calibración en Matadero.



Elaborado por: Crespo D, López T (2019)

Figura 21. Hidrograma de caudales simulados y observados en HBV-light durante la calibración en Matadero.

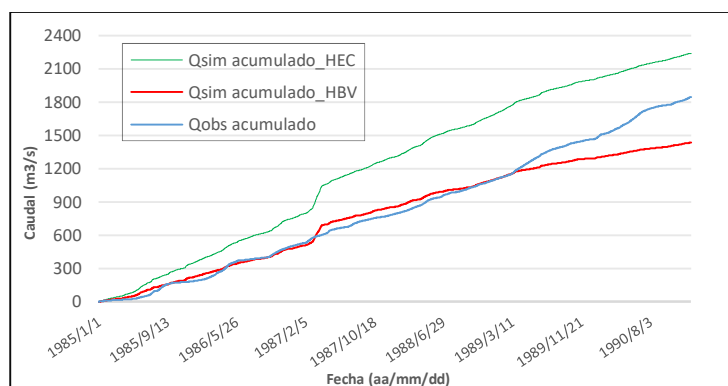


Elaborado por: Crespo D, López T (2019)

El balance hidrológico muestra que para la estación de Surucucho (Ver Figura 22), HEC-HMS sobrestima el volumen de agua simulado en un 21,21%, mientras en HBV-light hay una descarga de agua similar a través del tiempo, excepto a mediados de 1989 en donde se presenta una subestimación del caudal simulado con un sesgo de -22,40%. Para la estación de matadero (Ver Figura 23), el caudal simulado por HEC-HMS presenta una sobreproducción del volumen de agua del 17,13%; contrastando, HBV-light indica una marcada subestimación del 49,4%.

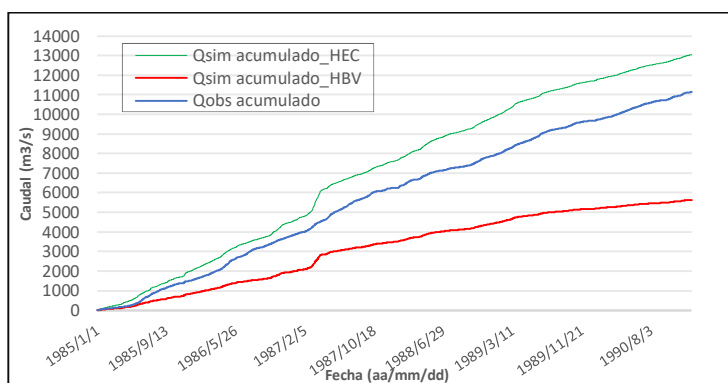
En general, a pesar de la sobreestimación o subestimación, el caudal simulado tiene un comportamiento semejante en ambos programas, mostrando incrementos y decrecimientos en el volumen de agua en fechas similares. En ambos puntos de monitoreo, HBV-light tiende a subestimar el caudal simulado, contrario a HEC-HMS que sobrestima los valores.

Figura 22. Balance hidrológico para HEC-HMS y HBV-light durante la calibración en Surucucho.



Elaborado por: Crespo D, López T (2019)

Figura 23. Balance hidrológico para HEC-HMS y HBV-light durante la calibración en Matadero.

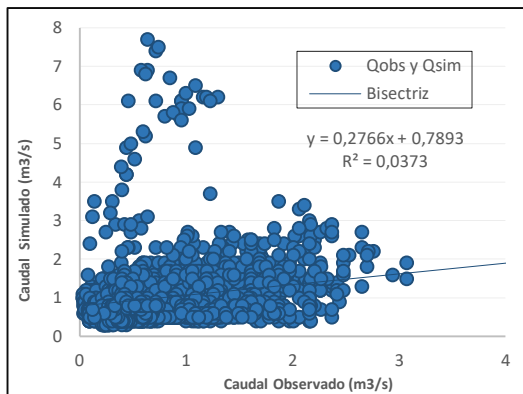


Elaborado por: Crespo D, López T (2019)

Para la estación de Surucucho las gráficas de dispersión son muy similares, con valores de $r=0,19$ y $R^2=0,0373$ para HEC-HMS (Ver Figura 24) y valores de $r=0,18$ y $R^2=0,0316$ para HBV-light (Ver Figura 25). El coeficiente de correlación de Pearson (r) indica una relación lineal positiva entre el caudal simulados y observado en ambos programas; a pesar de esto, la relación entre ambas variables es débil debido a que r es cercano a 0. En base al coeficiente de determinación (R^2) se estima que el 3,73% del caudal simulado por HEC-HMS está representado por la variación del caudal observado, mientras que HBV-light este porcentaje es del 3,16%.

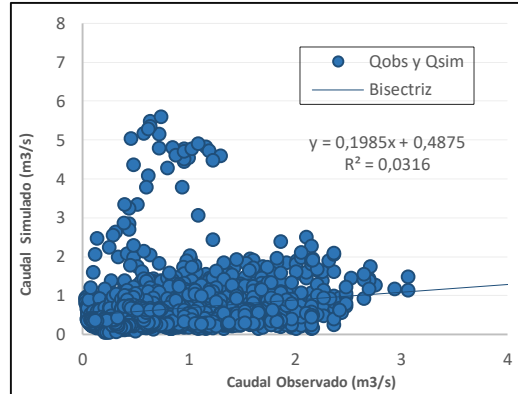
Para la estación de Matadero, las gráficas muestran mayor dispersión de datos para HEC-HMS. Existe una correlación positiva moderada entre las variables, obteniendo un $r=0,51$ en HEC-HMS (Ver Figura 26) y un $r=0,54$ en HBV-light (Ver Figura 27). Adicionalmente, el coeficiente de determinación (R^2) indica que el 25,92% y el 28,64% del caudal simulado está representado por la variación del caudal observado.

Figura 24. Relación entre el caudal simulado y observado en HEC-HMS durante la calibración en Surucucho.



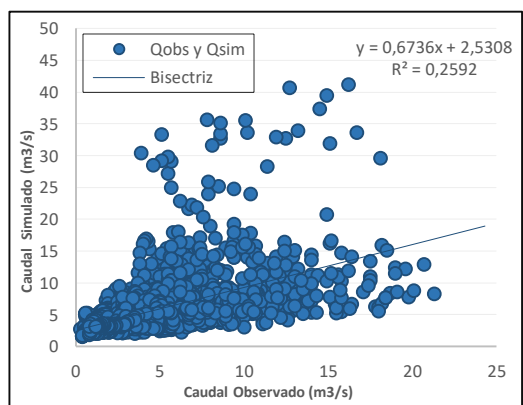
Elaborado por: Crespo D, López T (2019)

Figura 25. Relación entre el caudal simulado y observado en HBV-light durante la calibración en Surucucho



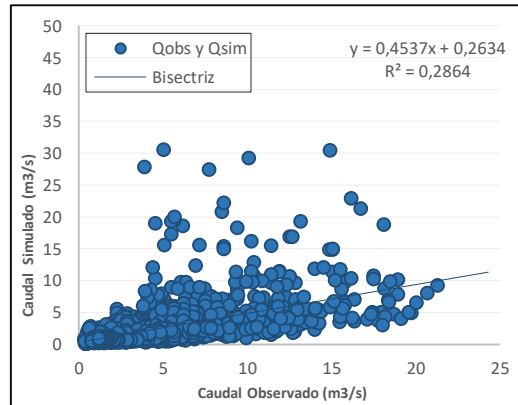
Elaborado por: Crespo D, López T (2019)

Figura 26. Relación entre el caudal simulado y observado en HEC-HMS durante la calibración en Matadero.



Elaborado por: Crespo D, López T (2019)

Figura 27. Relación entre el caudal simulado y observado en HBV-light durante la calibración en Matadero.



Elaborado por: Crespo D, López T (2019)

Los grupos de puntos fuera de la tendencia representan los valores del caudal simulado que no logran ajustarse al caudal observado, esto ocurre porque ninguno de los programas modela adecuadamente los caudales máximos. Los valores simulados por HBV-light presentan una menor dispersión de datos, los puntos se encuentran más cercanos a la bisectriz indicando que no existen tantos valores atípicos en comparación con HEC-HMS. Ambos programas, indican una mejor correlación entre los caudales simulados y observados en la estación de Matadero.

Con el objetivo de facilitar la comparación de resultados, se presenta a continuación una tabla resumen que contiene los valores del KGE, sesgo, r y R^2 para HEC-HMS y HBV-light en los puntos de monitoreo:

Tabla 28. Resultados de KGE, sesgo, r y R^2 en el periodo de calibración.

Puntos de monitoreo	HEC-HMS				HBV-light			
	KGE	Sesgo	r	R^2	KGE	Sesgo	r	R^2
Estación Surucucho	0,07	21,21	0,19	0,0373	0,14	-22,40	0,18	0,0316
Estación Matadero	0,39	17,13	0,51	0,2592	0,3	-49,40	0,54	0,2864

Elaborado por: Crespo D, López T (2019)

4.2 Resultados de la validación

Los valores del índice de eficiencia KGE para la estación de Surucucho y Matadero se muestran en la Tabla 29. En HEC-HMS el valor de KGE para la estación de Surucucho en el periodo de validación es mayor en comparación al periodo de calibración, indicando que los valores de KGE mejoraron a niveles de satisfactorio y bueno, partiendo de un valor insuficiente en la calibración. Por el contrario, en la estación de Matadero se obtienen valores de eficiencia insuficientes para la etapa de validación, a excepción de los periodos 1991-1994 y 2004-2010 que son satisfactorio y bueno, respectivamente.

En HBV-light los valores de KGE en Surucucho mejoran a satisfactorios y buenos, partiendo de un valor insuficiente en la calibración, similar a los valores de KGE en HEC-HMS. Para la estación de Matadero KGE muestra mayores eficiencias, partiendo de un valor satisfactorio en la calibración a satisfactorio, bueno y muy bueno en la validación.

Para la etapa de validación HBV-light muestra mejores valores de KGE para ambos puntos de monitoreo. Estos valores difieren con HEC-HMS, en vista de que no concuerdan numéricamente ni en los mismos periodos de tiempo. Se observa que en un mismo periodo un programa muestra valores muy bajos o muy altos en comparación al otro, haciendo evidente que no existe una relación entre los resultados de ambos modelos para la estación de Matadero.

Tabla 29. Valores de los índices de eficiencia en los periodos de validación en HEC-HMS y HBV-light

Punto de monitoreo	Periodo	Índice de eficiencia KGE			
		HEC_HMS		HBV-light	
Estación Surucucho	1991-1994	0,54	Bueno	0,31	Satisfactorio
	1995-2003	0,32	Satisfactorio	0,54	Bueno
	2004-2010	0,22	Satisfactorio	0,42	Bueno
	2011-2014	0,46	Bueno	0,56	Bueno
Estación Matadero	1991-1994	0,49	Bueno	0,26	Satisfactorio
	1995-2003	0,03	Insuficiente	0,65	Muy bueno
	2004-2010	0,21	Satisfactorio	0,57	Bueno
	2011-2014	0	Insuficiente	0,63	Muy bueno

Elaborado por: Crespo D, López T (2019)

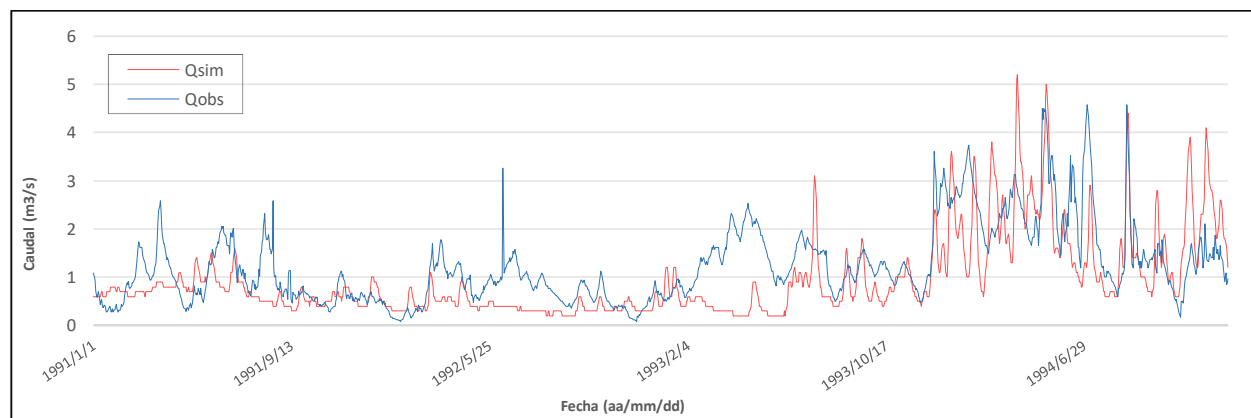
En HEC-HMS se realizó una calibración manual de los parámetros en base a los requerimientos ya descritos, mientras que en HBV-light se implementó la calibración Monte Carlo, cuyos rangos de parámetros fueron obtenidos de fuentes bibliográficas. La calibración manual incluye un procedimiento de prueba y error para ajustar los datos simulados a los observados e incluye una constante inspección por parte del modelador. Autores como William (2014) indican que este enfoque paso a paso puede generar resultados superiores a los obtenidos por procesos automáticos, aunque esto no se cumple en la validación para HEC-HMS se debe considerar que las diferencias de resultados entre ambos programas pueden ser consecuencia de las diferencias entre las estructuras y la conceptualización de cada programa.

- **Resultados para el periodo de validación 1991-1994**

Los hidrogramas para Surucucho indican que para HEC-HMS (Ver Figura 28) y HBV-light (Ver Figura 29), no hay un ajuste visual del caudal simulado con el observado hasta finales del año 1993, en donde HEC-HMS genera un mejor ajuste. El caudal simulado por HEC-HMS se observa homogéneo durante varios días formando líneas rectas. Este comportamiento se atribuye a la generación de flujo sub-superficial debido a que, al tratarse de una subcuenca de páramo alto andina, los procesos de regulación y retención de agua toman un largo tiempo; según Cabrera (2017) el flujo sub-superficial dura alrededor de 43 días en salir de la subcuenca.

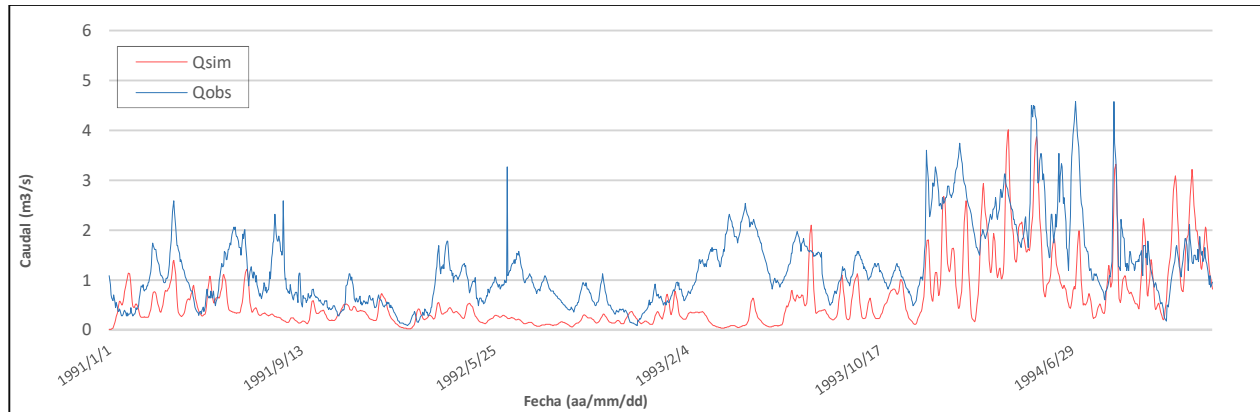
Los hidrogramas para Matadero muestran mejor ajuste visual de picos altos a partir de finales de 1993; anterior a este año, HEC-HMS (Ver Figura 30) representa mejor los caudales medios a comparación de HBV-light (Ver Figura 31).

Figura 28. Hidrograma de caudales simulados y observados en HEC-HMS durante la validación 1991-1994 en Surucucho.



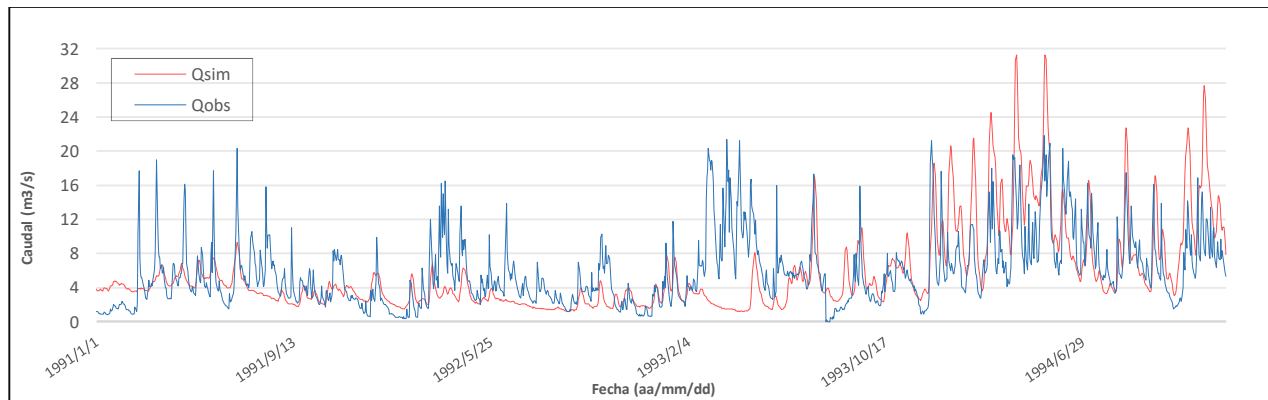
Elaborado por: Crespo D, López T (2019)

Figura 29. Hidrograma de caudales simulados y observados en HBV-light durante la validación 1991-1994 en Surucucho.



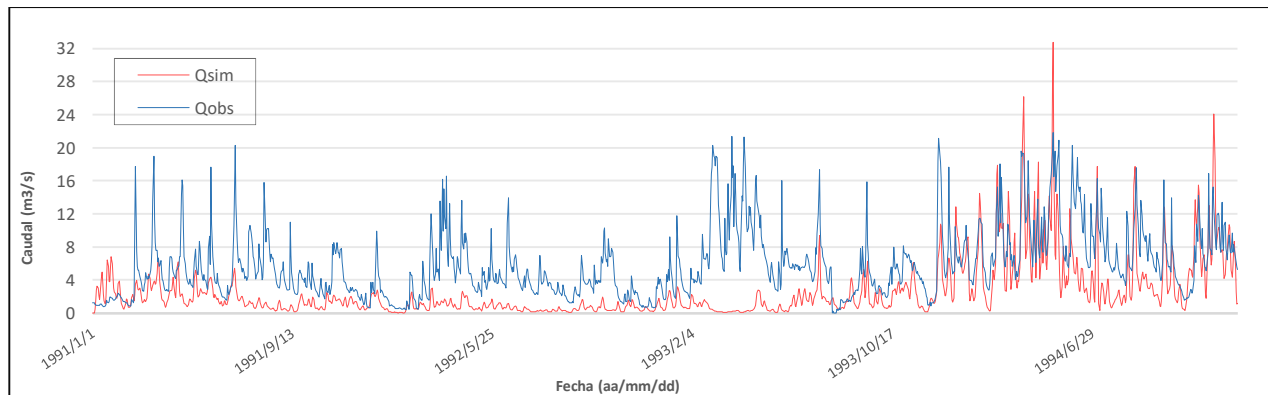
Elaborado por: Crespo D, López T (2019)

Figura 30. Hidrograma de caudales simulados y observados en HEC-HMS durante la validación 1991-1994 en Matadero.



Elaborado por: Crespo D, López T (2019)

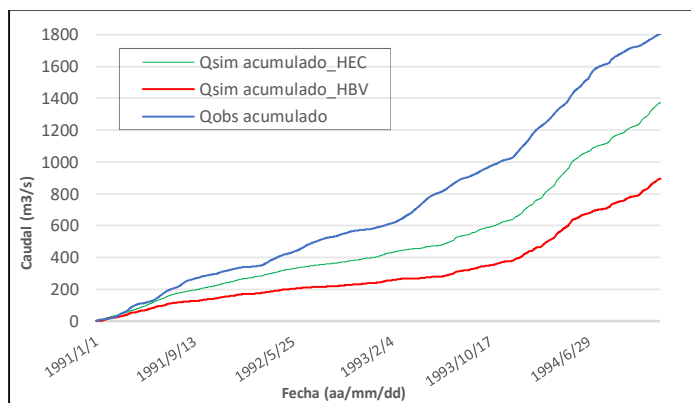
Figura 31. Hidrograma de caudales simulados y observados en HBV-light durante la validación 1991-1994 en Matadero.



Elaborado por: Crespo D, López T (2019)

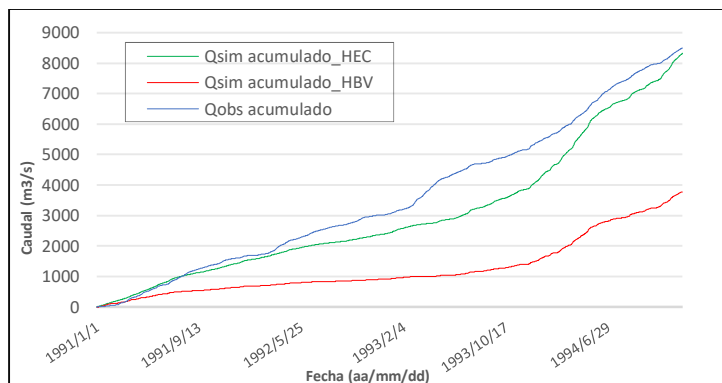
Para Surucucho el balance de agua en la subcuenca (Ver Figura 32) muestra que aunque ambos programas tienen porcentajes de subestimación de 23,91% para HEC-HMS y 50,4% para HBV-light, la diferencia en el volumen es menor en HEC-HMS. Para Matadero (Ver Figura 33) el volumen de agua simulado por HEC-HMS presenta una subestimación de caudal simulado de 2,08%. En HBV-light existe una mayor subestimación del caudal correspondiente al 55,60%.

Figura 32. Balance hidrológico para HEC-HMS y HBV-light durante la validación 1991-1994 en Surucucho.



Elaborado por: Crespo D, López T (2019)

Figura 33. Balance hidrológico para HEC-HMS y HBV-light durante la validación 1991-1994 en Matadero.



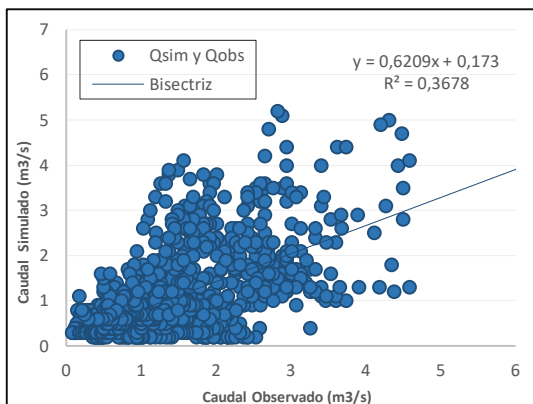
Elaborado por: Crespo D, López T (2019)

Para Surucucho, La Figura 34 y la Figura 35 muestran mejoras en la correlación en comparación con el periodo de calibración, con valores de $r=0,61$ y $r=0,58$ respectivamente. Adicionalmente, el coeficiente de determinación (R^2) indica que el 36,78% y el 33,17% del caudal simulado está representado por la variación del caudal observado en HEC-HMS y HVB-light respectivamente.

En Matadero ambos programas tuvieron limitaciones es en la modelación de caudales mínimos y máximos lo que aumenta la dispersión, obteniendo valores de correlación de $r=53$ y $r=54$ para

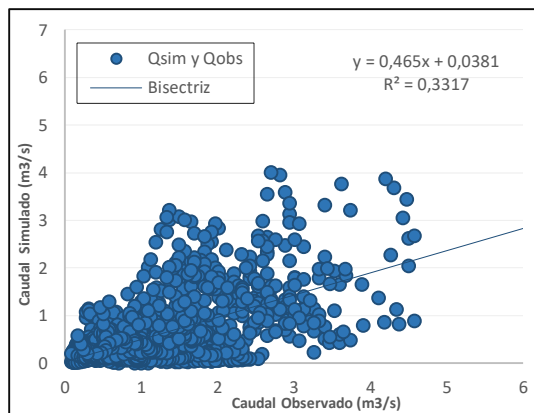
HEC-HMS (Ver Figura 36) y HVB-light (Ver Figura 37). Basado en el coeficiente de determinación (R^2) el 27,78% (en HEC-HMS) y el 29,09% (en HVB-light) del caudal simulado está representado por la variación del caudal observado.

Figura 34. Relación entre el caudal simulado y observado en HEC-HMS durante la validación 1991-1994 en Surucucho.



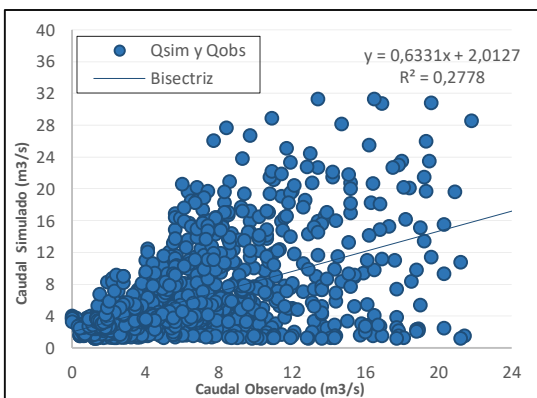
Elaborado por: Crespo D, López T (2019)

Figura 35. Relación entre el caudal simulado y observado en HBV-light durante la validación 1991-1994 en Surucucho.



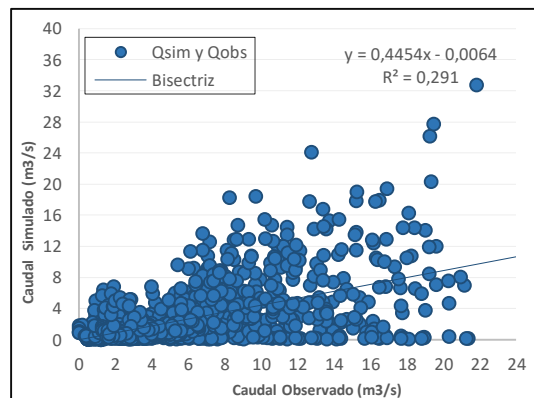
Elaborado por: Crespo D, López T (2019)

Figura 36. Relación entre el caudal simulado y observado en HEC-HMS durante la validación 1991-1994 en Matadero.



Elaborado por: Crespo D, López T (2019)

Figura 37. Relación entre el caudal simulado y observado en HBV-light durante la validación 1991-1994 en Matadero.

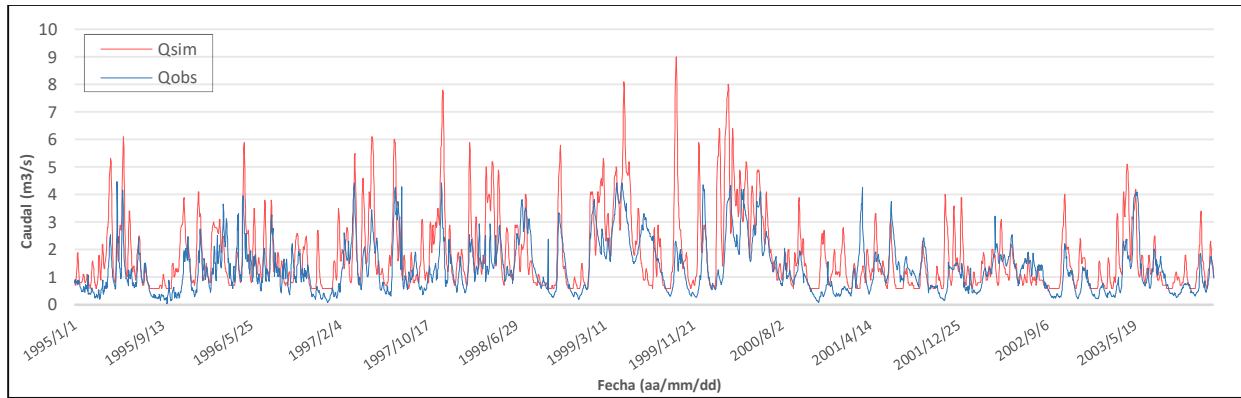


Elaborado por: Crespo D, López T (2019)

• Resultados para el periodo de validación 1995-2003

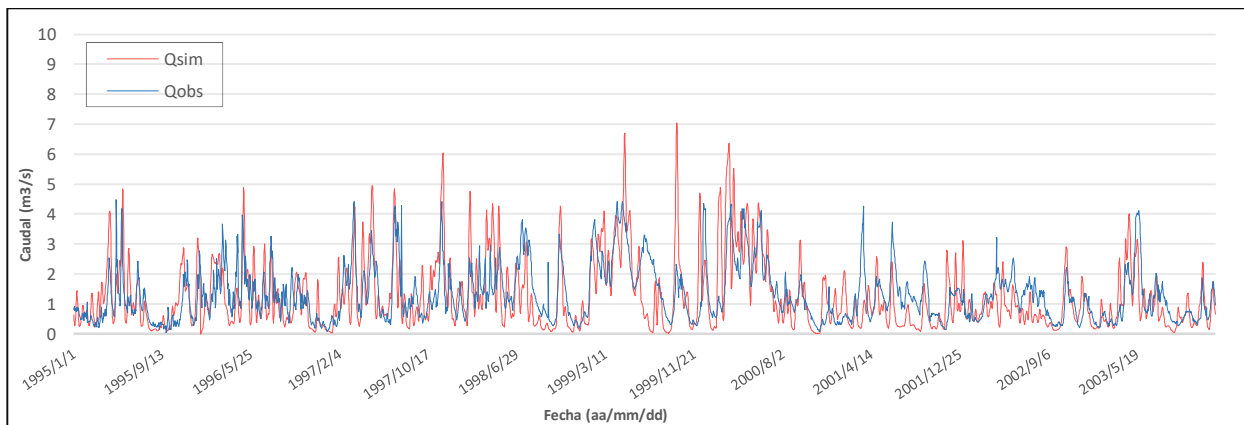
Los hidrogramas resultantes para Surucucho (Ver Figura 38 y Figura 39) y para Matadero (Ver Figura 40 y Figura 41) indican que existe un mejor ajuste visual para HBV-light en comparación con HEC-HMS. En general, en HEC-HMS los picos altos simulados exceden a los observados, lo que afecta el valor del índice KGE y la correlación entre variables.

Figura 38. Hidrograma de caudales simulados y observados en HEC-HMS durante la validación 1995-2003 en Surucucho.



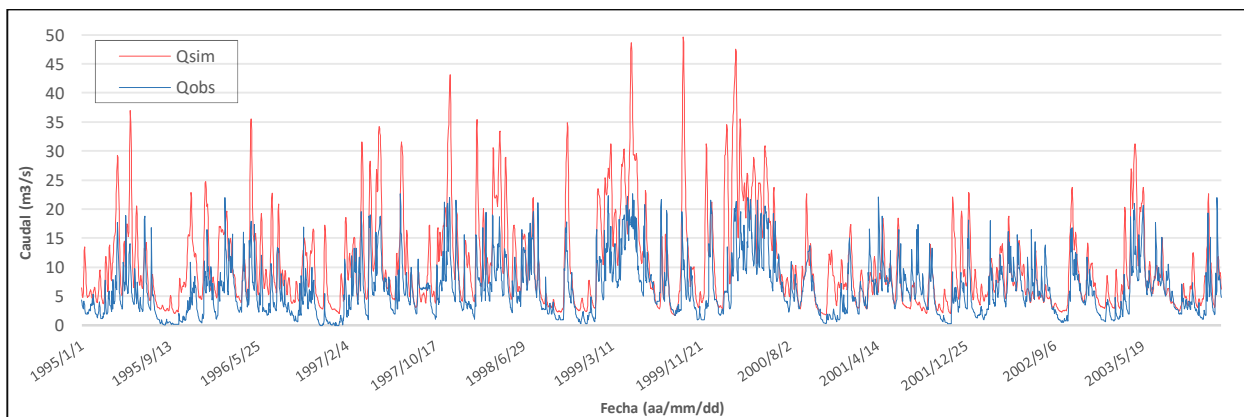
Elaborado por: Crespo D, López T (2019)

Figura 39. Hidrograma de caudales simulados y observados en HBV-light durante la validación 1995-2003 en Surucucho.



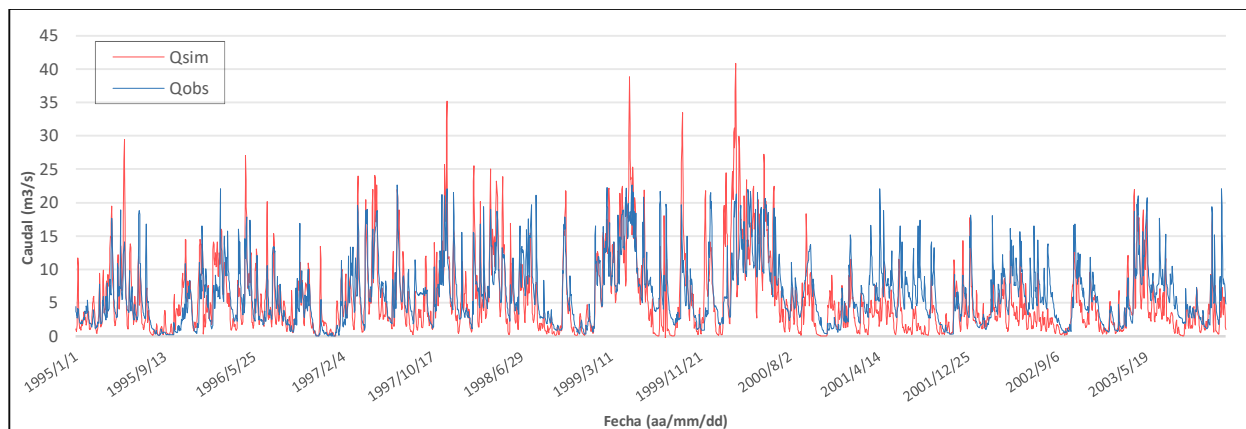
Elaborado por: Crespo D, López T (2019)

Figura 40. Hidrograma de caudales simulados y observados en HEC-HMS durante la validación 1995-2003 en Matadero.



Elaborado por: Crespo D, López T (2019)

Figura 41. Hidrograma de caudales simulados y observados en HBV-light durante la validación 1995-2003 en Matadero.

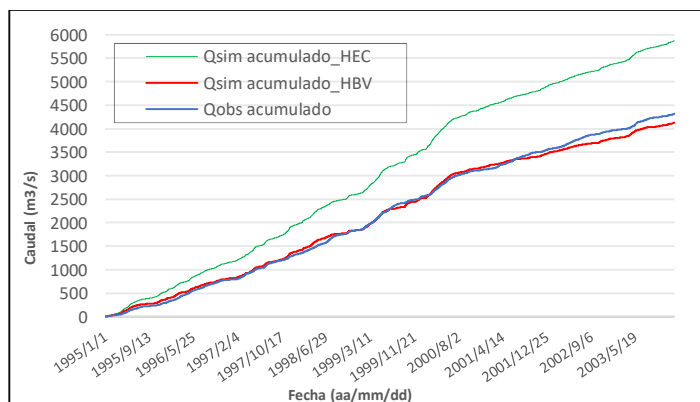


Elaborado por: Crespo D, López T (2019)

Para Surucucho las gráficas de balance (Ver Figura 42) muestran que HEC-HMS sobreestima el caudal simulado en 35,95%, esto genera que los picos del caudal simulado no se ajusten a los picos del caudal observado. Para HBV-light hay una gran similitud entre los caudales, esto significa que a lo largo de tiempo se descarga un volumen igual de agua; pero a partir inicios de 2001 existe un sesgo entre los valores resultantes generando una subestimación del caudal simulado del 4,4%.

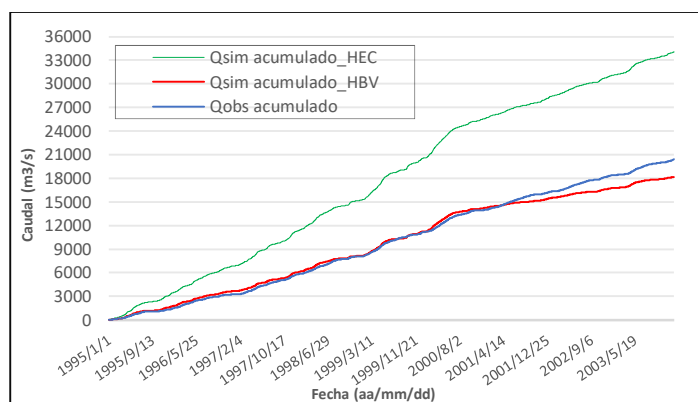
Para el mismo periodo en Matadero (Ver Figura 43), las gráficas de balance describen resultados similares a Surucucho, con una sobreestimación del volumen mayor para HEC-HMS del 66,94% a comparación de la sobreestimación del 10,7% para HBV-light.

Figura 42. Balance hidrológico para HEC-HMS y HBV-light durante la validación 1995-2003 en Surucucho.



Elaborado por: Crespo D, López T (2019)

Figura 43. Balance hidrológico para HEC-HMS y HBV-light durante la validación 1995-2003 en Matadero.

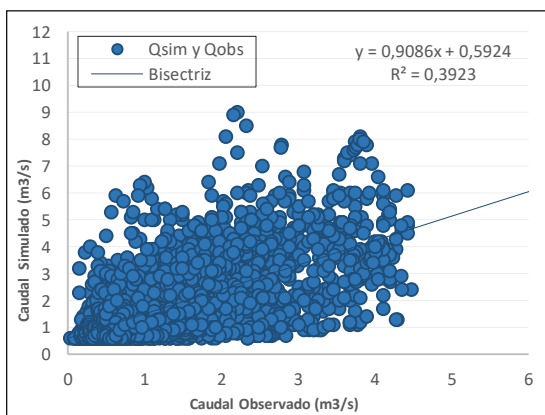


Elaborado por: Crespo D, López T (2019)

En las gráficas de dispersión para Surucucho (Figura 44 y Figura 45) se observa que los puntos tienen proximidad a la bisectriz, lo que indica que los valores totales simulados no se encuentran muy alejados de los valores totales históricos registrados, en comparación a otros periodos de validación. En este periodo existe mayor correlación entre variables con valores $r=0,63$ para ambos programas. El coeficiente de determinación (R^2) indica que el 39,23% (HEC-HMS) y 39,1% (HBV-light) del caudal simulado está representado por la variación del caudal observado.

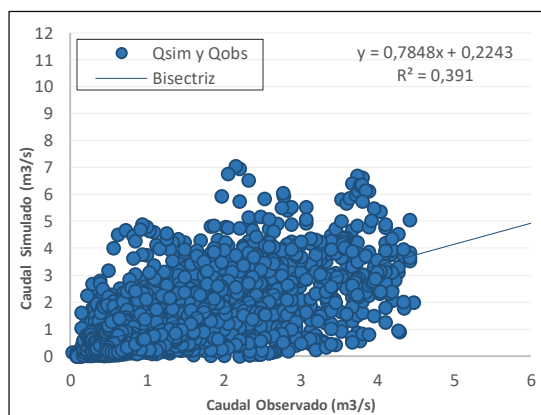
Para el mismo periodo en Matadero, las gráficas de dispersión para HEC-HMS (Ver Figura 46) y HBV-light (Ver Figura 47) muestran una mayor correlación entre valores estimados y registrados con valores de $r=0,72$ para ambos programas. El coeficiente de determinación (R^2) señala que el 51,92% (HEC-HMS) y el 52,72% (HBV-light) del caudal simulado está representado por la variación del caudal observado.

Figura 44. Relación entre el caudal simulado y observado en HEC-HMS durante la validación 1995-2003 en Surucucho.



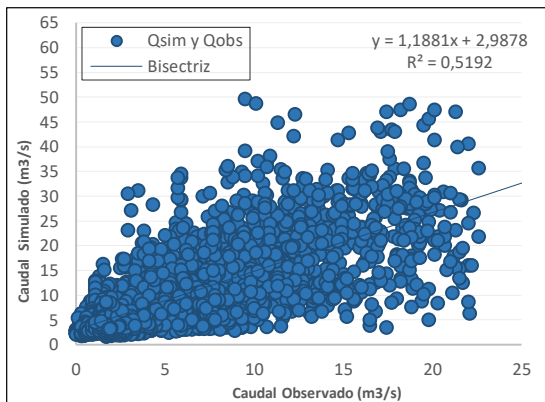
Elaborado por: Crespo D, López T (2019)

Figura 45. Relación entre el caudal simulado y observado en HBV-light durante la validación 1995-2003 en Surucucho.



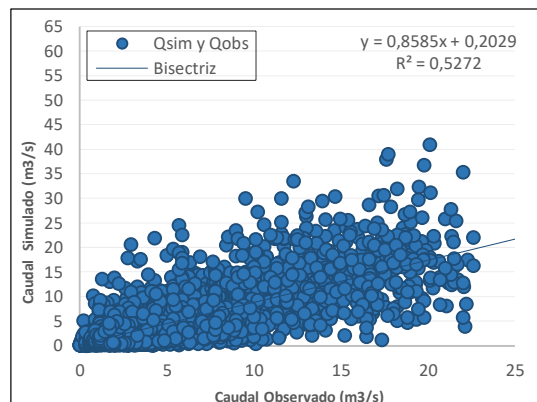
Elaborado por: Crespo D, López T (2019)

Figura 46. Relación entre el caudal simulado y observado en HEC-HMS durante la validación 1995-2003 en Matadero.



Elaborado por: Crespo D, López T (2019)

Figura 47. Relación entre el caudal simulado y observado en HBV-light durante la validación 1995-2003 en Matadero.



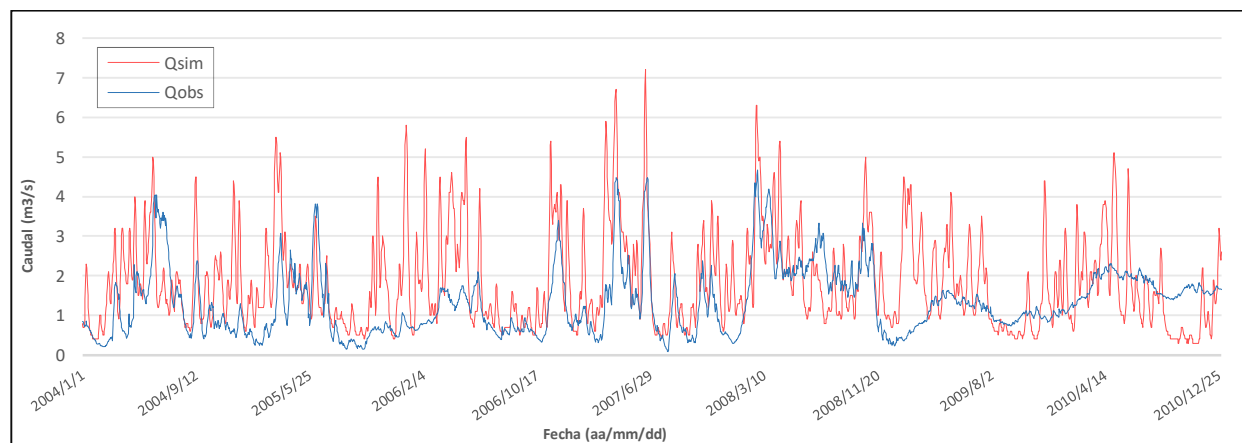
Elaborado por: Crespo D, López T (2019)

• Resultados para el periodo de validación 2004-2010

Los hidrogramas resultantes para Surucucho muestran una deficiencia en el ajuste de picos altos y bajos en especial para HEC-HMS (Ver Figura 48); en HBV-light (Ver Figura 49) el caudal simulado presenta un mejor ajuste a las curvas del caudal observado a excepción del periodo con mayor diferencia que empieza a finales de 2008 para ambos programas.

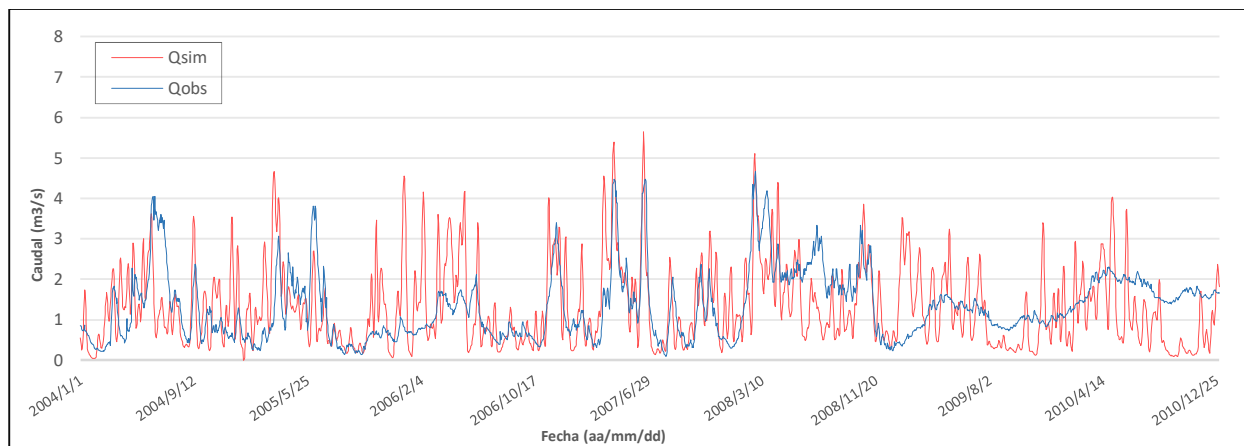
En cuanto a Matadero, los hidrogramas indican un mejor ajuste visual para HBV - light (Ver Figura 51) en comparación con HEC-HMS (Ver Figura 50) a excepción de finales de 2008, en donde ninguno de los caudales simulados por ambos programas logra ajustarse.

Figura 48. Hidrograma de caudales simulados y observados en HEC-HMS durante la validación 2004-2010 en Surucucho



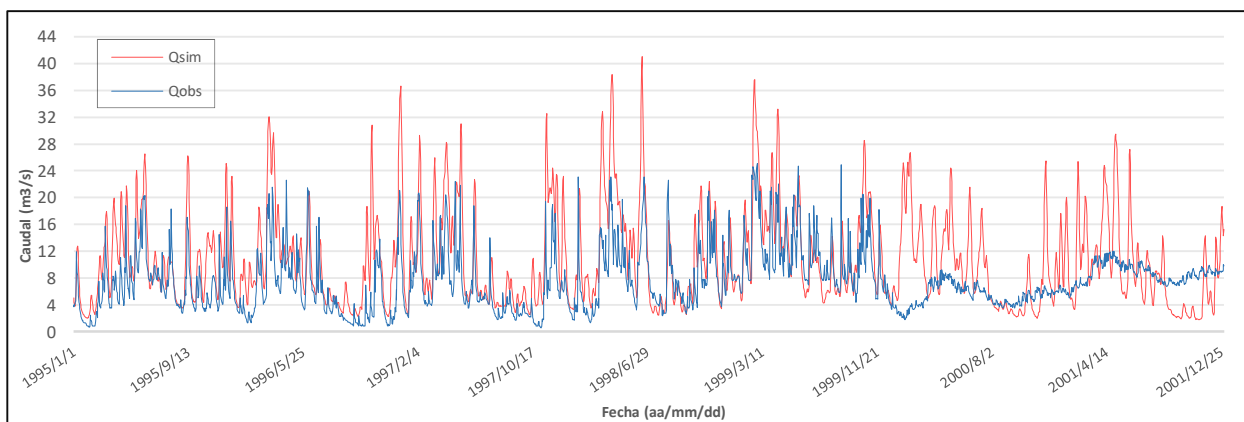
Elaborado por: Crespo D, López T (2019)

Figura 49. Hidrograma de caudales simulados y observados en HBV-light durante la validación 2004-2010 en Surucucho



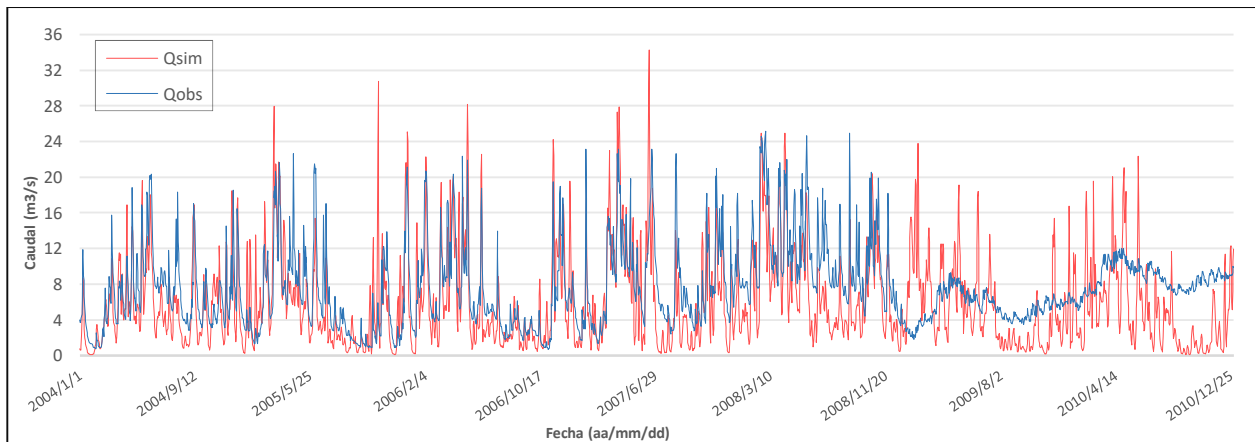
Elaborado por: Crespo D, López T (2019)

Figura 50. Hidrograma de caudales simulados y observados en HEC-HMS durante la validación 2004-2010 en Matadero.



Elaborado por: Crespo D, López T (2019)

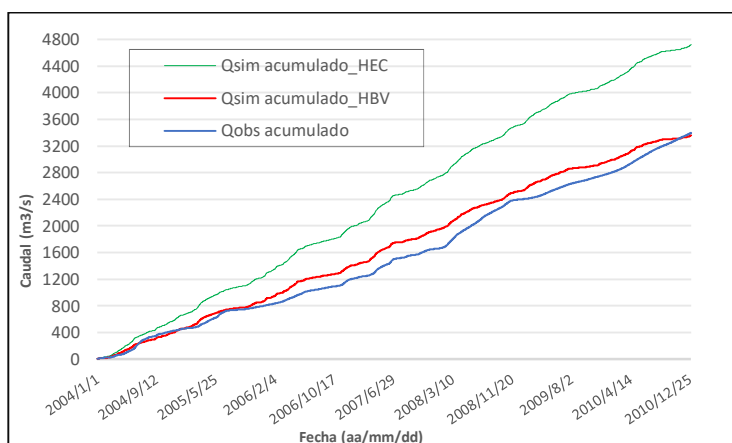
Figura 51. Hidrograma de caudales simulados y observados en HBV-light durante la validación 2004-2010 en Matadero.



Elaborado por: Crespo D, López T (2019)

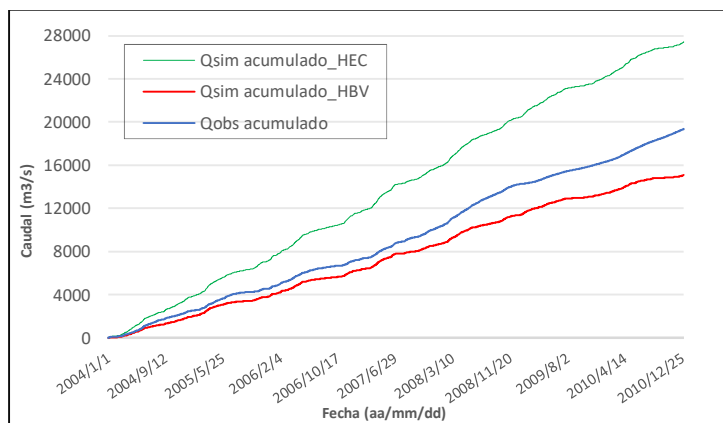
El balance de agua para Surucucho (Ver Figura 52) indica que en HEC-HMS el volumen de agua simulada se sobreestima en un 39,03%, mientras que en HBV- light muestra una sobreestimación del 1% que no supone una gran diferencia entre el volumen de descarga simulados y observado. En Matadero (Ver Figura 53) indica una sobreestimación del 41,66% en los valores simulados para HEC-HMS y una subestimación del caudal simulado para HBV- light del 21,8%.

Figura 52. Balance hidrológico para HEC-HMS y HBV-light durante la validación 2004-2010 en Surucucho.



Elaborado por: Crespo D, López T (2019)

Figura 53. Balance hidrológico para HEC-HMS y HBV-light durante la validación 2004-2010 Matadero.

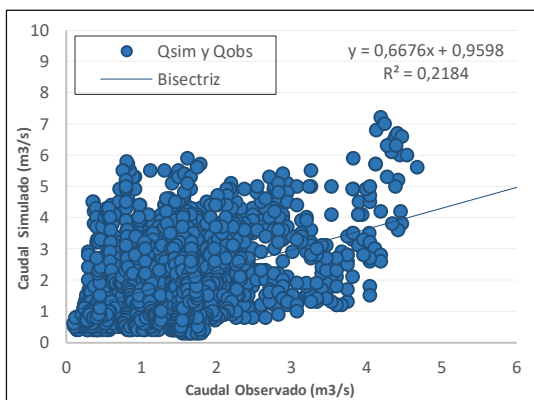


Elaborado por: Crespo D, López T (2019)

Para Surucucho, las gráficas de dispersión reflejan un mejor ajuste para los caudales bajos y mayor dispersión en los caudales altos con valores de $r=47$ y $R^2=0,21$ para HEC-HMS (Ver Figura 54) y $r=45$ y $R^2=0,20$ para HBV-light (Ver Figura 55). El coeficiente de determinación (R^2) señala que el 21,84% y el 20,23% del caudal simulado está representado por la variación del caudal observado.

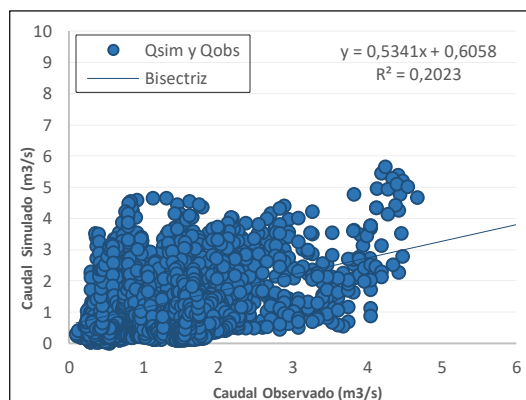
En cuanto a la dispersión de datos para Matadero, la Figura 57 muestra que los puntos en HBV-light están más apegados a la bisectriz con valores de $r=0,67$ y $R^2=0,44$, indicando que existe mayor correlación que en HEC-HMS. Este último presenta valores de $r=0,63$ y $R^2=0,4$ (Ver Figura 56). El coeficiente de determinación (R^2) señala que el 40,21% y el 44,75% del caudal simulado está representado por la variación del caudal observado.

Figura 54. Relación entre el caudal simulado y observado en HEC-HMS durante la validación 2004-2010 en Surucucho.



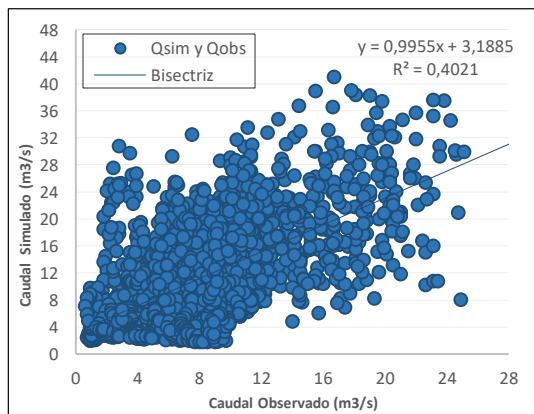
Elaborado por: Crespo D, López T (2019)

Figura 55. Relación entre el caudal simulado y observado en HBV-light durante la validación 2004-2010 en Surucucho.



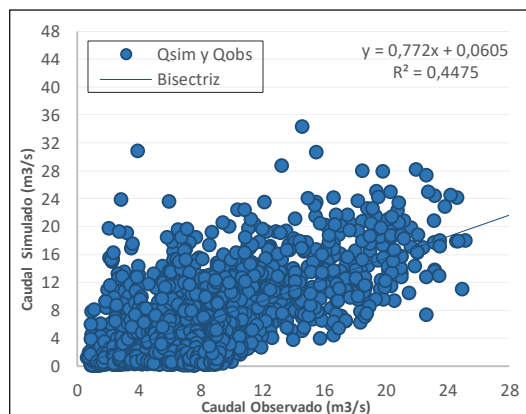
Elaborado por: Crespo D, López T (2019)

Figura 56. Relación entre el caudal simulado y observado en HEC-HMS durante la validación 2004-2010 en Matadero.



Elaborado por: Crespo D, López T (2019)

Figura 57. Relación entre el caudal simulado y observado en HBV-light durante la validación 2004-2010 en Matadero.



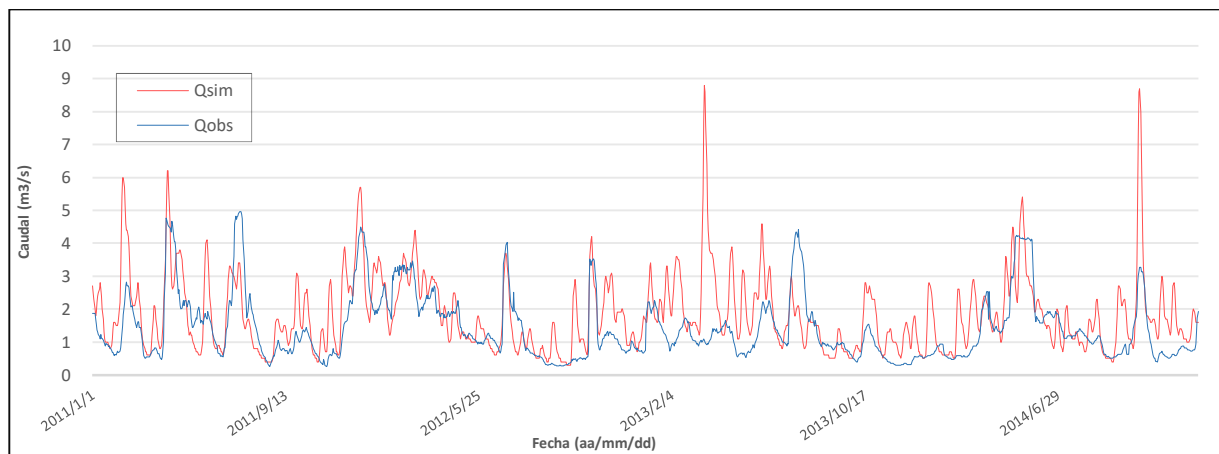
Elaborado por: Crespo D, López T (2019)

- Resultados para el periodo de validación 2011-2014.**

Los hidrogramas para Surucucho no ajustan de forma visual a las curvas del caudal observado, pero debido a la generación de picos más altos en HEC-HMS (Ver Figura 58), HBV-light acopla

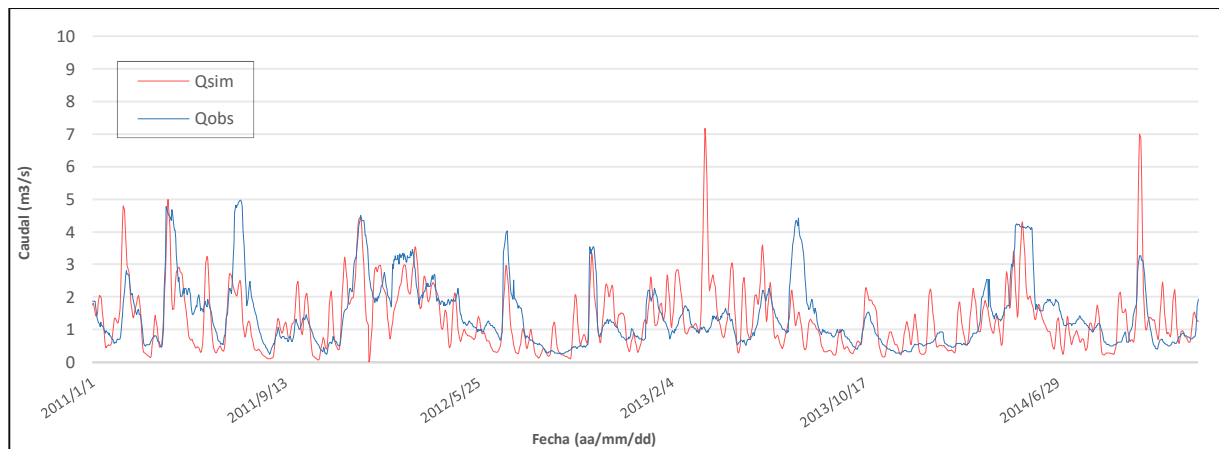
de mejor manera el caudal simulado al observado (Ver Figura 59). Para el mismo periodo de validación en Matadero, los hidrogramas indican un mejor ajuste visual para HBV-light (Ver Figura 61) en comparación con HEC-HMS (Ver Figura 60).

Figura 58. Hidrograma de caudales simulados y observados en HEC-HMS durante la validación 2011-2014 en Surucucho



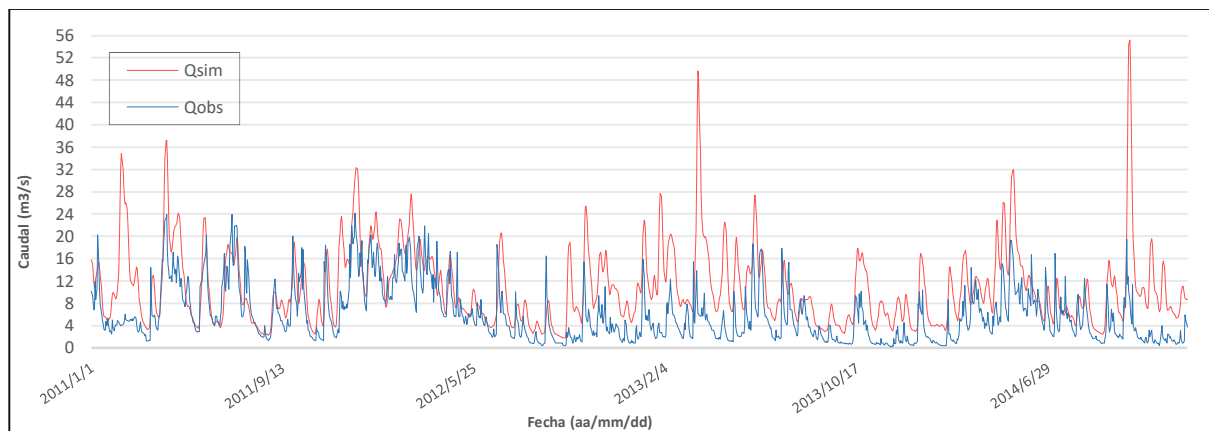
Elaborado por: Crespo D, López T (2019)

Figura 59. Hidrograma de caudales simulados y observados en HBV-light durante la validación 2011-2014 en Surucucho



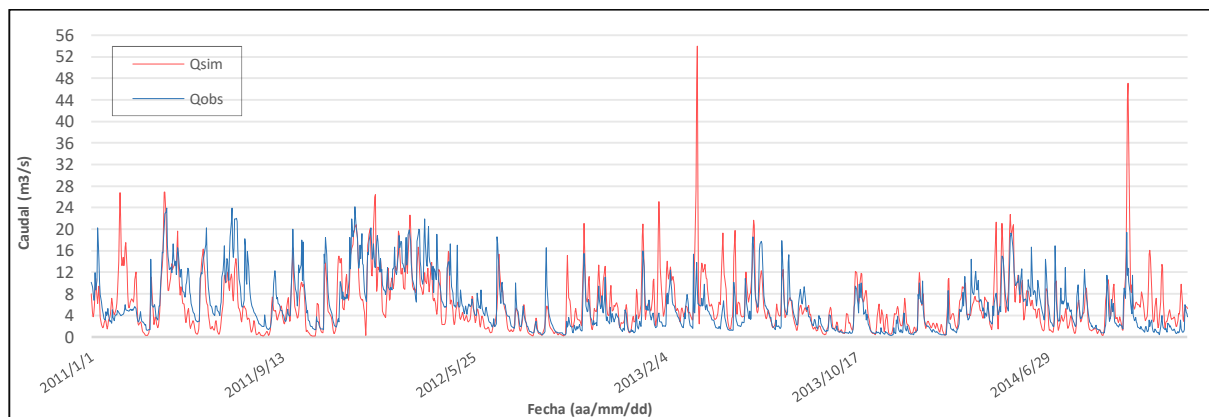
Elaborado por: Crespo D, López T (2019)

Figura 60. Hidrograma de caudales simulados y observados en HEC-HMS durante la validación 2011-2014 en Matadero.



Elaborado por: Crespo D, López T (2019)

Figura 61. Hidrograma de caudales simulados y observados en HBV-light durante la validación 2011-2014 en Matadero.

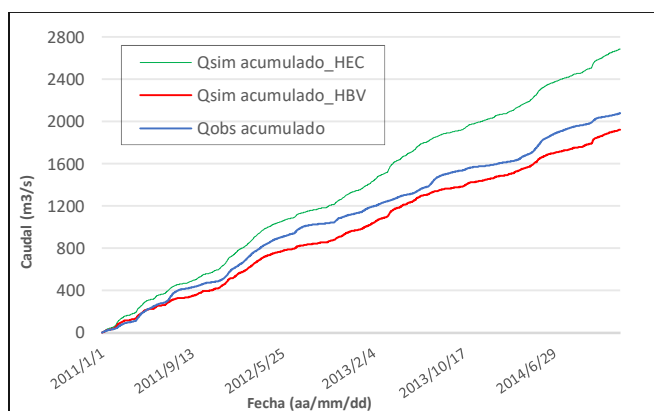


Elaborado por: Crespo D, López T (2019)

Al comparar el balance de agua entre ambos programas para Surucucho (Ver Figura 62) se observa una subestimación del 7,4% para HBV-light, mientras que HEC-HMS indica una sobreestimación del caudal simulado del 29,26%.

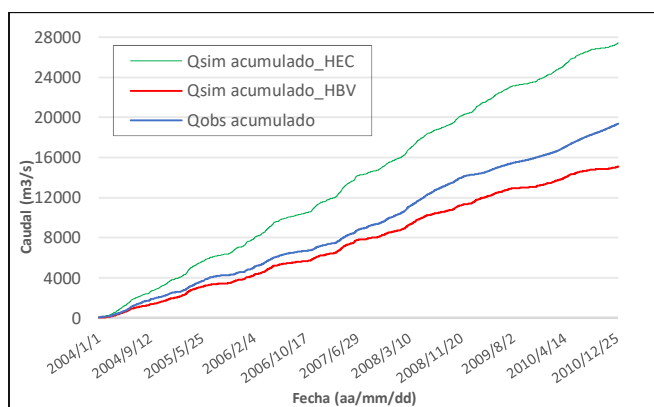
El balance de agua para Matadero (Ver Figura 63) muestra una sobreestimación de caudal del 82,17% para HEC-HMS y para HBV-light existe un volumen de descarga similar a lo largo del tiempo con una sobrestimación del 2%.

Figura 62. Balance hidrológico para HEC-HMS y HBV-light durante la validación 2011-2014 en Surucucho.



Elaborado por: Crespo D, López T (2019)

Figura 63. Balance hidrológico para HEC-HMS y HBV-light durante la validación 2011-2014 en Matadero.

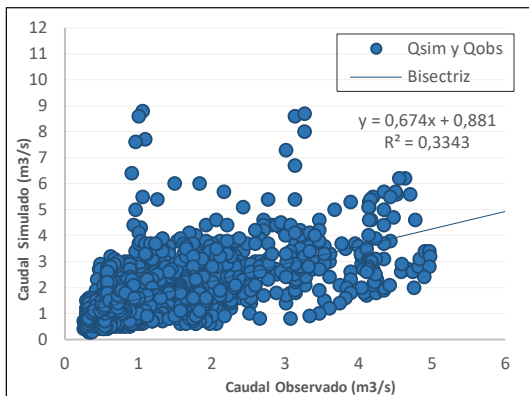


Elaborado por: Crespo D, López T (2019)

Las gráficas de dispersión para Surucucho indican similitud en la correlación de las variables para ambos programas, pero debido a la generación de picos más altos que no logran ajustarse al caudal observado, el valor de $r=0,58$ en HEC-HMS (Ver Figura 64) es inferior al valor de $r=0,56$ obtenido en HBV-light (Ver Figura 65). El coeficiente de determinación (R^2) indica que el 33,43% y el 31,74% del caudal simulado está representado por la variación del caudal observado.

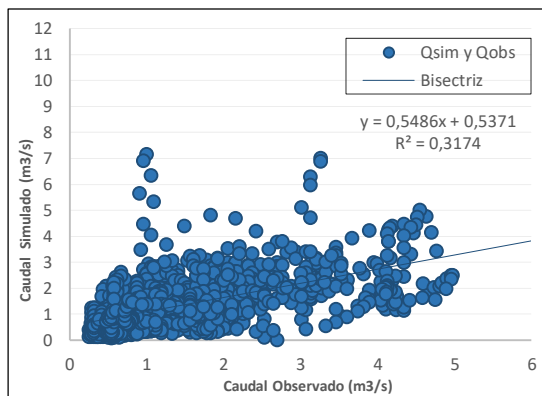
En Matadero hay una mejor correlación para HBV-light con un valor de $r=0,64$ (Ver Figura 67) en comparación con HEC-HMS con un valor de $r=0,58$ (Ver Figura 66). El coeficiente de determinación (R^2) señala que el 33,95% y el 40,91% del caudal simulado está representado por la variación del caudal observado.

Figura 64. Relación entre el caudal simulado y observado en HEC-HMS durante la validación 2011-2014 en Surucucho.



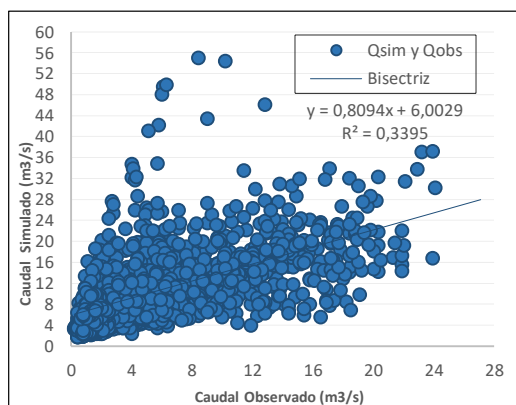
Elaborado por: Crespo D, López T (2019)

Figura 65. Relación entre el caudal simulado y observado en HBV-light durante la validación 2011-2014 en Surucucho.



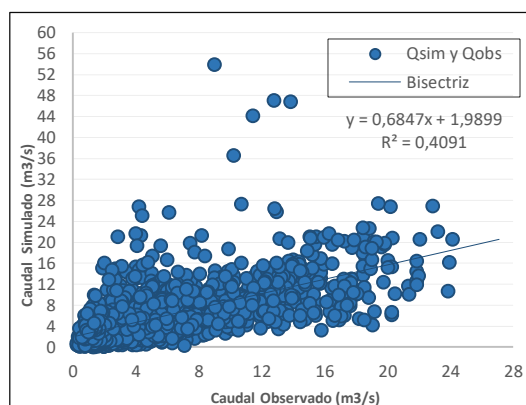
Elaborado por: Crespo D, López T (2019)

Figura 66. Relación entre el caudal simulado y observado en HEC-HMS durante la validación 2011-2014 en Matadero.



Elaborado por: Crespo D, López T (2019)

Figura 67. Relación entre el caudal simulado y observado en HBV-light durante la validación 2011-2014 en Matadero.



Elaborado por: Crespo D, López T (2019)

Similar al periodo de calibración, en la validación HEC-HMS produce mayor volumen de agua y mayores picos en todos los periodos de validación y tiende a sobrestimar el caudal a excepción de ciertos periodos de tiempo. Por otro lado, HBV-light tiende a subestimar los valores, aunque presenta menor sesgo entre el caudal simulados y observado. En general, HEC-HMS representa de mejor manera el flujo base producidos por el flujo sub-superficial; las variaciones del valor de KGE entre periodos se deben a que este evalúa el ajuste a picos y al existir una sobreestimación o subestimación, el valor del índice se ve afectado.

Los resultados que más difieren entre programas se encuentran en Matadero. Esto puede deberse a que, a pesar de que se realizó una modelación semidistribuida, no se cuentan con las suficientes estaciones pluviométricas e hidrometereológicas para representar el comportamiento

de las variables meteorológicas de cada una de las microcuencas en las que se dividió la zona de estudio en HEC-HMS, mientras que en HBV-light se realizó una modelación agregada en donde los datos de precipitación y ETp fueron ponderados para una sola microcuenca.

A continuación, se presenta una tabla resumen con los valores del KGE, sesgo, r y R^2 para HEC-HMS y HBV-light en los puntos de monitoreo:

Tabla 30. Resultados de KGE, Sesgo, r y R^2 en el periodo de validación.

Punto de monitoreo	Periodo	HEC-HMS				HBV-light			
		KGE	Sesgo	r	R^2	KGE	Sesgo	r	R^2
Estación Surucucho	1991-1994	0,54	-23,91	0,61	0,3678	0,31	-50,4	0,58	0,3317
	1995-2003	0,32	35,95	0,63	0,3923	0,54	-4,40	0,63	0,391
	2004-2010	0,22	39,03	0,47	0,2184	0,42	-1	0,45	0,2023
	2011-2014	0,46	29,26	0,58	0,3343	0,56	-7,4	0,56	0,3174
Estación Matadero	1991-1994	0,49	-2,08	0,53	0,2778	0,26	-55,6	0,54	0,2909
	1995-2003	0,03	66,40	0,72	0,5192	0,65	-10,70	0,72	0,5272
	2004-2010	0,21	41,66	0,63	0,4021	0,57	-21,8	0,67	0,4475
	2011-2014	0	82,17	0,58	0,3395	0,63	2	0,64	0,4091

Elaborado por: Crespo D, López T (2019)

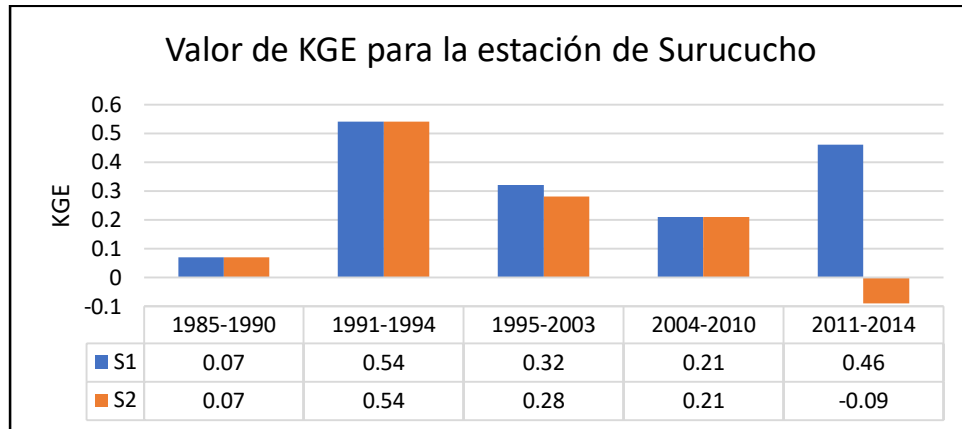
4.3 Resultados de la influencia del cambio de uso de suelo sobre el caudal

En esta sección se analiza la respuesta de los modelos hidrológicos frente al cambio de uso de suelo mediante la variación del KGE, al incluir y al desprestigiar este factor a lo largo del tiempo. A continuación, se describen los resultados obtenidos para HEC-HMS y HBV-light:

4.3.1 HEC-HMS

Empezando por la estación de Surucucho, tal como se muestra en la Figura 68 se observa que los índices de KGE mejoraron a valores de satisfactorio y bueno cuando se considera el cambio de uso de suelo, partiendo de un valor de insuficiente en la calibración. Al no considerar el uso de suelo los valores de KGE en la validación fueron de bueno a insuficiente. Igualmente, en Matadero también se observa una variación en los valores de KGE, tal como se muestra en la Figura 69. Este resultado ayudó a establecer una relación de inversa proporcionalidad entre el valor del número de curva y los parámetros de modelación de tiempo de retardo y coeficiente de agua subterránea 1, es decir, se asume que el cambio de uso de suelo tiene repercusiones directas en el flujo superficial y sub-superficial; por ende, sobre el comportamiento hidrológico de la subcuenca. Adicionalmente, se puede inferir que HEC-HMS es sensible al cambio de uso de suelo debido a que, si este factor se considera constante en el tiempo, el índice KGE decae.

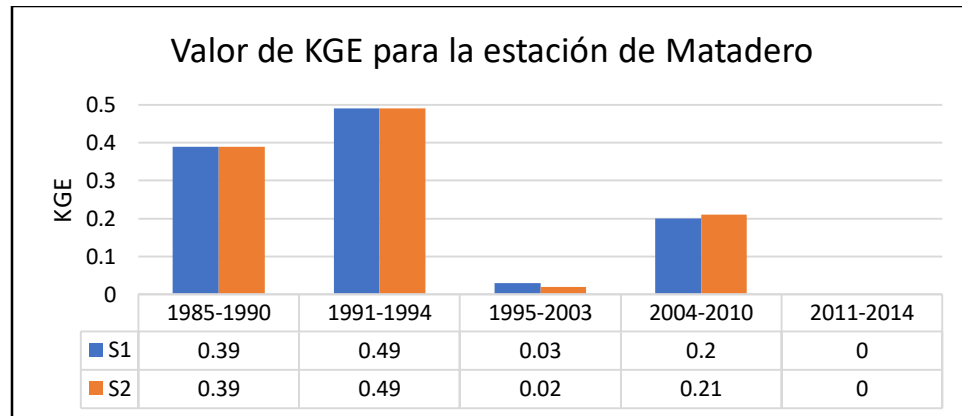
Figura 68. Comparación de los valores de KGE en Surucucho al considerar y al despreciar el cambio de uso de suelo en HEC-HMS.



S1: Valores de KGE considerando el uso de suelo.
S2: Valores de KGE sin considerar el uso de suelo.

Elaborado por: Crespo D, López T (2019)

Figura 69. Comparación de los valores de KGE en Matadero al considerar y al despreciar el cambio de uso de suelo en HEC-HMS.



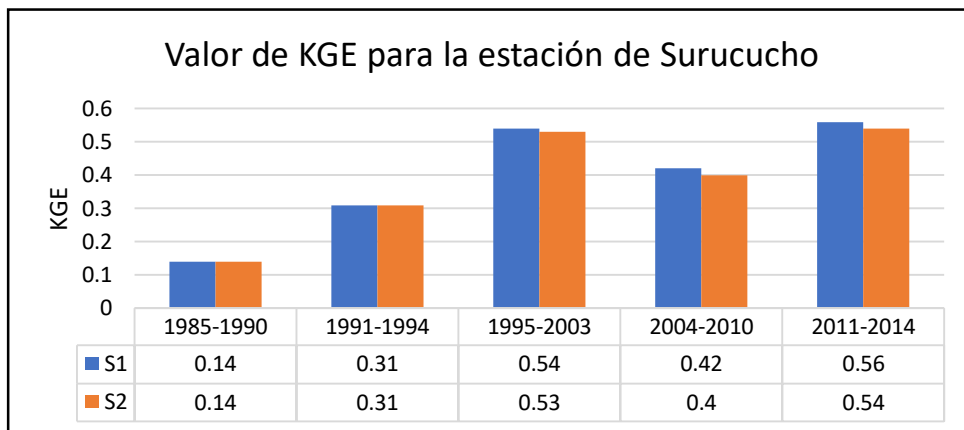
S1: Valores de KGE considerando el uso de suelo.
S2: Valores de KGE sin considerar el uso de suelo.

Elaborado por: Crespo D, López T (2019)

4.3.2 HBV-light

Los resultados de la influencia del uso de suelo para Surucucho Figura 70 y Matadero Figura 71, indican que a pesar de una mejora en los valores de KGE al considerar el cambio de uso de suelo, este no es muy significativo como lo es en HEC-HMS; por ello se considera que el uso de suelo en HBV-light está relacionado al tipo de cobertura vegetal y la evaporación, sin repercutir sobre los flujos en las capas superficial y sub-superficial del suelo, por ende, en el caudal total simulado por el modelo hidrológico.

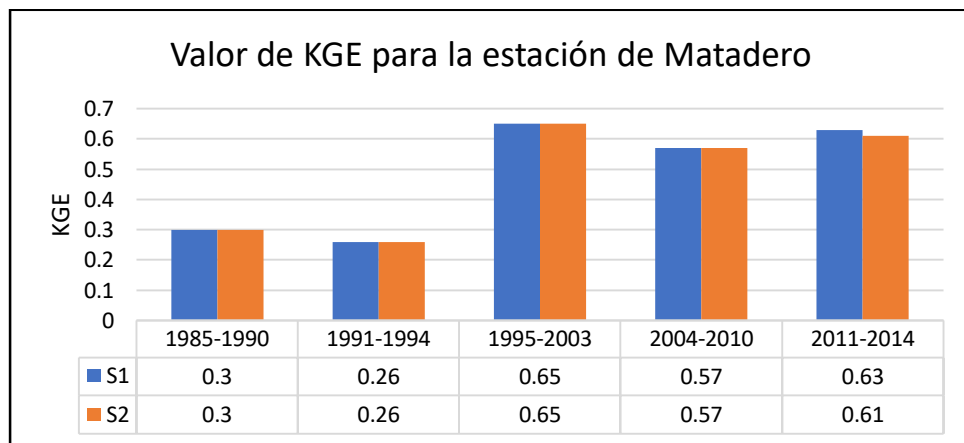
Figura 70. Comparación de los valores de KGE en Surucucho al considerar y al despreciar el cambio de uso de suelo en HBV-light.



S1: Valores de KGE considerando el uso de suelo.
S2: Valores de KGE sin considerar el uso de suelo.

Elaborado por: Crespo D, López T (2019)

Figura 71. Comparación de los valores de KGE en Matadero al considerar y al despreciar el cambio de uso de suelo en HBV-light.



S1: Valores de KGE considerando el uso de suelo.
S2: Valores de KGE sin considerar el uso de suelo.

Elaborado por: Crespo D, López T (2019)

4.4 Resultados del análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad fue implementado sobre los parámetros más representativos de los modelos, con el objetivo de determinar su influencia sobre el caudal registrado. A continuación, se presentan los resultados para HEC-HMS y HBV- light:

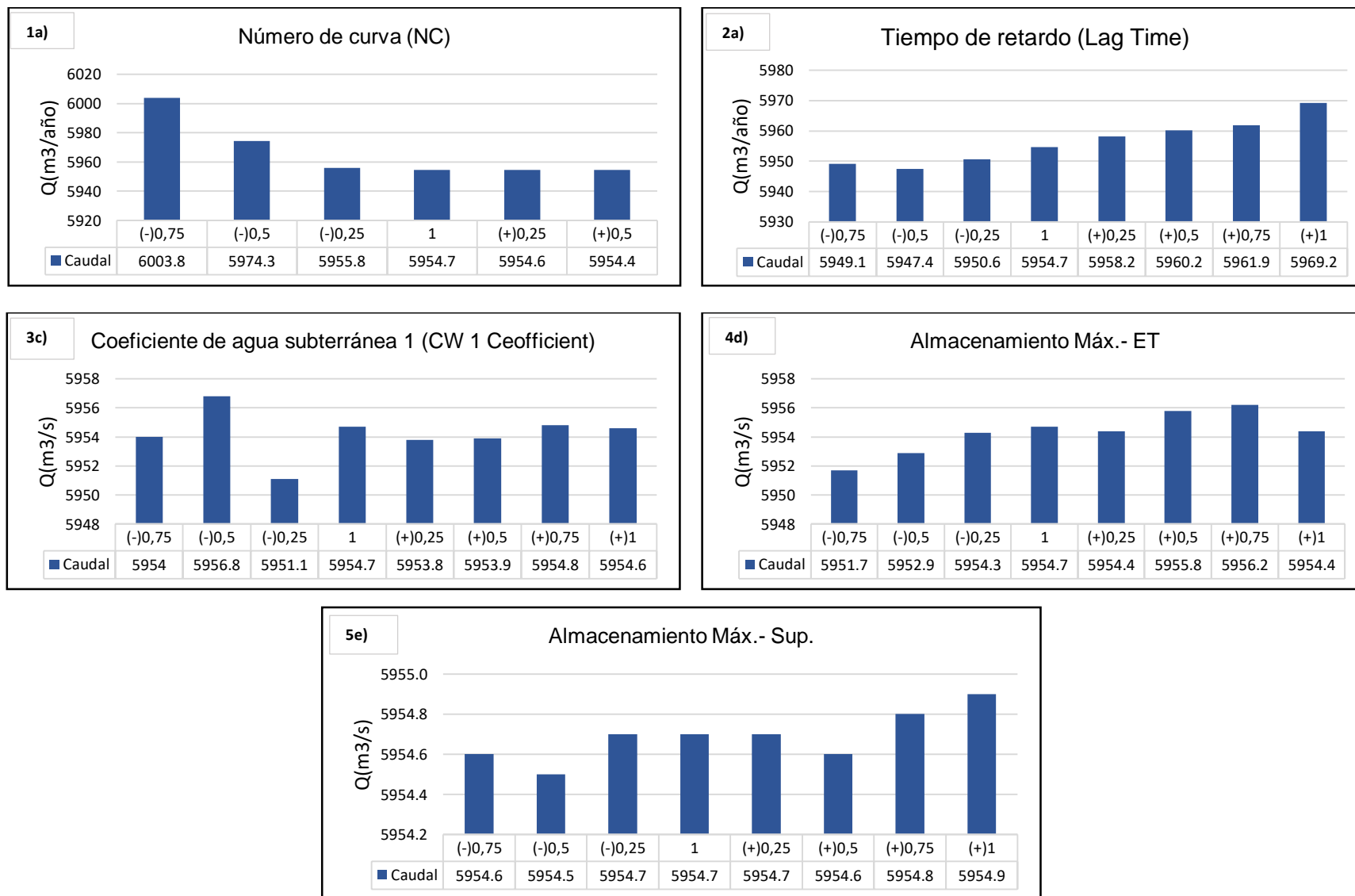


4.4.1 HEC-HMS

La Figura 72 muestra una comparación entre la sumatoria del caudal registrado (5954,7 m³/s) y la sumatoria de los caudales estimados, producidos por la variación porcentual de los parámetros. Los parámetros sujetos a análisis son: el número de curva, tiempo de retardo, el coeficiente de agua subterránea 1, almacenamiento máximo en la evapotranspiración y almacenamiento máximo superficial. El resto de parámetros no fueron considerados debido a que después del periodo de calentamiento resultaron ser despreciables.

La gráfica 1a muestra un decrecimiento lineal del caudal y una relación inversa, es decir, entre menor sea el número de curva mayor será el caudal simulado. Esta relación es más evidente en los valores más bajos de parámetro. Por el contrario, la gráfica 2b indica que el tiempo de retardo tiene una relación directa, es decir, entre incrementa su valor también incrementará el caudal. Para el coeficiente de agua subterránea 1, la gráfica 3c muestra que la mayor variación del caudal ocurre en los valores más bajos del parámetro. Conforme incrementa su valor, su influencia sobre el caudal se hace menos significativa. Para el almacenamiento máximo superficial, la gráfica 5e muestra que no hay una relación lineal sobre la generación de caudal, a pesar de ello, tiende a incrementar conforme incrementa el valor del parámetro. Finalmente, en la gráfica 4d se puede observar que el caudal tiende a incrementar a medida que incrementan los valores del almacenamiento máximo de la evapotranspiración.

Figura 72. Variación de parámetros resultado del análisis de sensibilidad en HEC-HMS



Elaborado por: Crespo D, López T (2019)

La Tabla 31 muestra los resultados del error medio cuadrático (EMC) y el sesgo (PBIAS) calculados para dichos caudales.

En base al error medio cuadrático y el sesgo, el tiempo de retardo y número de curva son los parámetros con mayor influencia sobre la generación de caudal. La variación del tiempo de retardo genera errores y sesgos más altos a lo largo del rango analizado, con valores máximos de EMC=1,61, una subestimación de 0,10% y sobrestimación de 0,20%. De igual forma, la variación del número de curva resulta en un EMC=0,07 y subestimaciones de 0,8% y 0,3% en el caudal, únicamente en los valores más bajos del parámetro. Para el coeficiente de agua subterránea 1, almacenamiento máximo de la evapotranspiración y almacenamiento máximo superficial, si bien existe una influencia sobre el caudal esta no es lo suficientemente grande para generar un error y sesgo representativos.

Tabla 31. Valores de EMC y sesgo para el análisis de sensibilidad en HEC-HMS

Descripción	Parámetro	Valores						
		(-)0,75	(-)0,5	(-)0,25	(+)0,25	(+)0,5	(+)0,75	(+)1
Error medio cuadrático (EMC)	Número de curva	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	-	-
	Tiempo de retardo	1,61	0,58	0,12	0,07	0,22	0,39	0,55
	Coef. Agua sub. 1	0,00	0,01	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00
	Almacenamiento Máx.- ET	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Almacenamiento Máx.Sup.	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Sesgo (PBIAS)	Número de curva	0,80	0,30	0,00	0,00	0,00	-	-
	Tiempo de retardo	-0,10	-0,10	-0,10	0,10	0,10	0,10	0,20
	Coef. Agua sub. 1	0,00	0,00	-0,10	0,00	0,00	0,00	0,00
	Almacenamiento Máx.- ET	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Almacenamiento Máx.Sup.	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

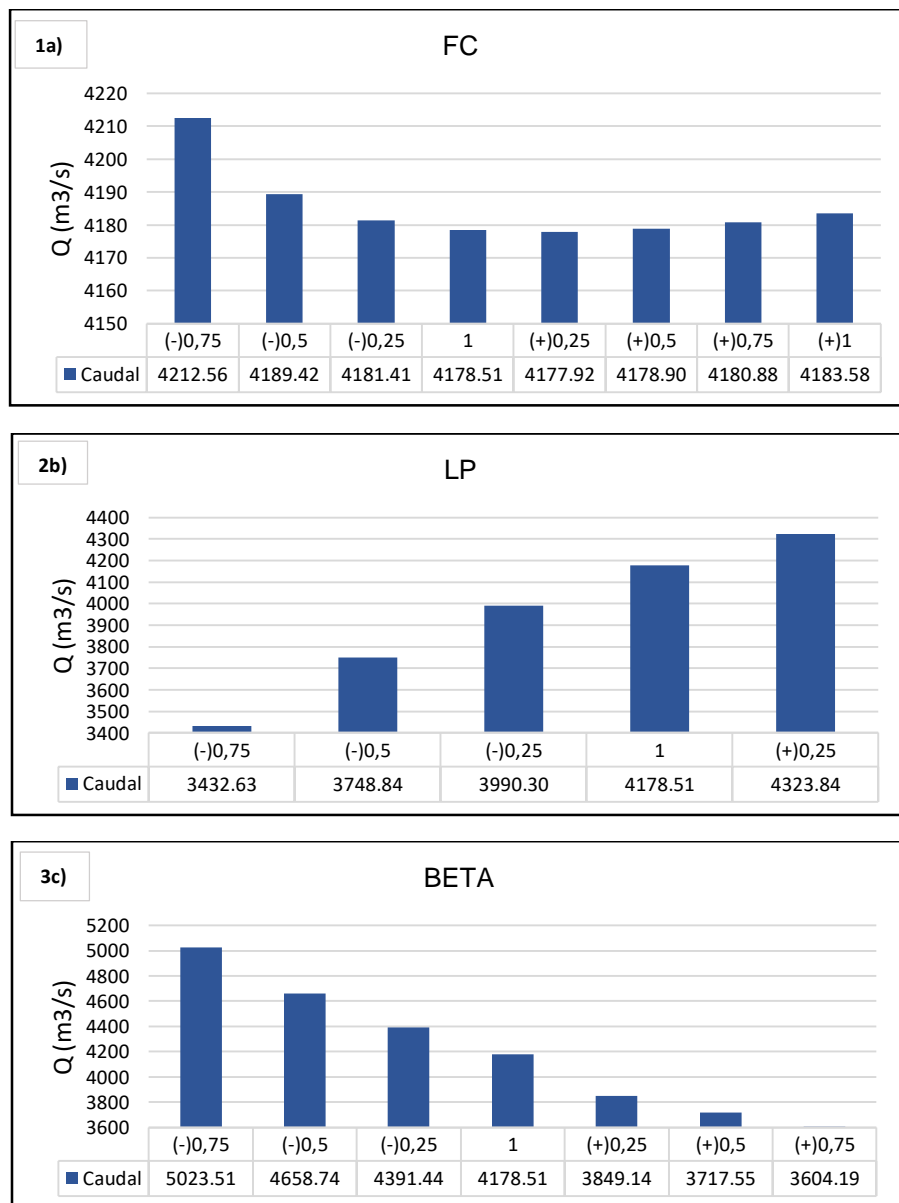
Elaborado por: Crespo D, López T (2019)

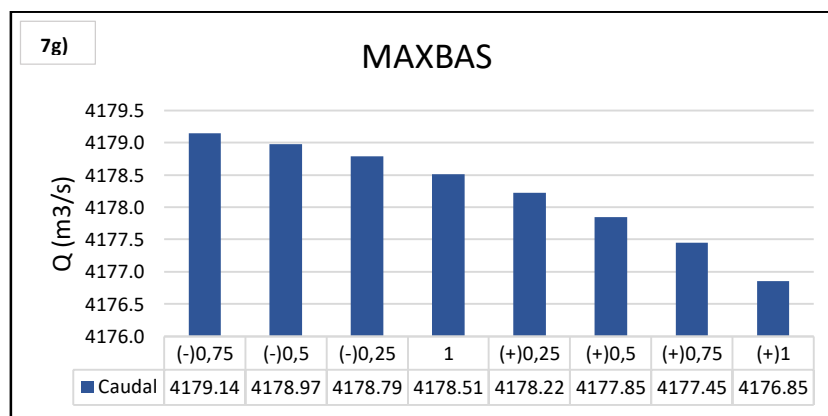
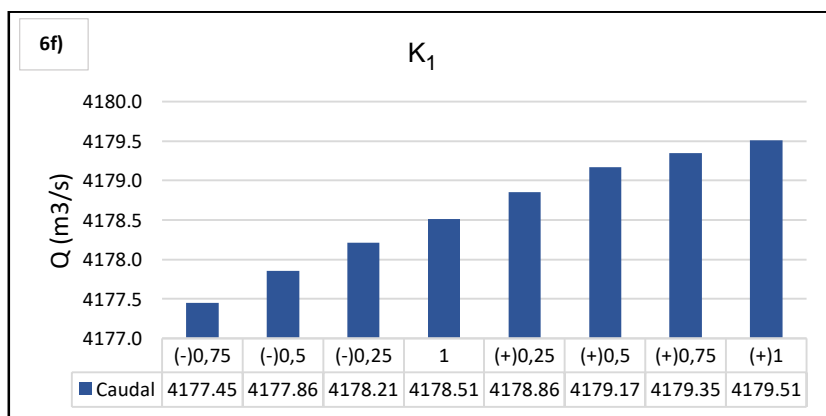
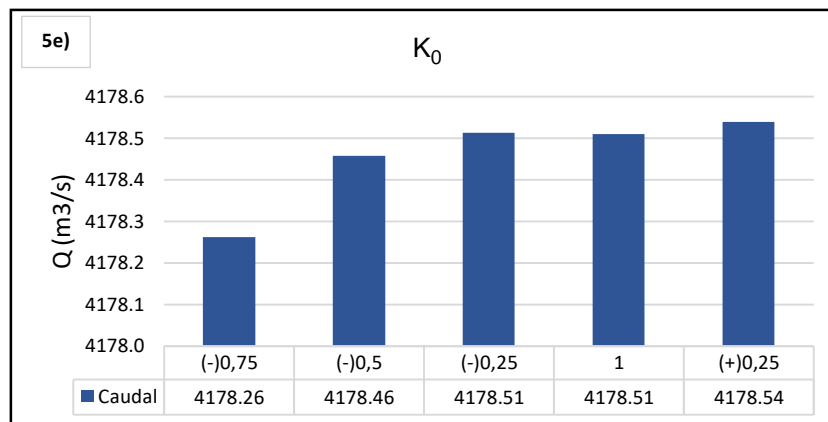
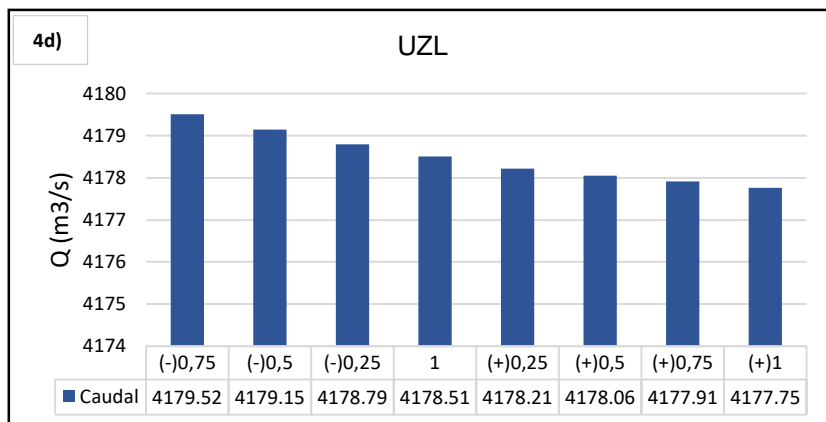
4.4.2 HBV-light

La Figura 73 muestra una comparación entre la sumatoria del caudal registrado (4178,51 m³/s) y la sumatoria de los caudales estimados que son generados por la variación de cada parámetro.

En las gráficas 1a, 3c, 4d, 7g se observa que los parámetros FC, BETA, UZL y MAXBAS tienen una relación lineal directa sobre la generación de caudal, es decir que mientras incrementen los valores de los parámetros se incrementará el caudal. Por otro lado, en las gráficas 2b, 5e, 6f se aprecia que los parámetros LP, K₀ y K₁ tienen una relación inversa, ya que entre menor sean los valores de cada parámetro mayor será el caudal.

Figura 73. Variación de parámetros resultado del análisis de sensibilidad en HBV-light





Elaborado por: Crespo D, López T (2019)

La Tabla 32 muestra los resultados del error medio cuadrático (EMC) y el sesgo (PBIAS) calculados para dichos caudales.

Los resultados del error medio cuadrático y el sesgo indican que los parámetros LP y BETA tiene mayor influencia sobre la generación de caudal. Para el parámetro LP que representa el valor de humedad del suelo sobre el cual la evapotranspiración actual alcanza la evapotranspiración potencial, presenta valores máximos del error medio cuadrático y subestimaciones en el caudal para los valores más bajos del parámetro. Para BETA que es el parámetro que determina la contribución relativa de la precipitación a la escorrentía, presenta valores máximos del error medio cuadrático y sesgo tanto para los valores más bajos y más altos del parámetro.

Finalmente, a pesar de que la variación de los parámetros FC, K₀, K₁, MAXBAS y UZL generan un error, no hay una influencia significativa sobre el sesgo.

Tabla 32. Valores de EMC y sesgo para el análisis de sensibilidad en HBV-light

Descripción	Parámetro	Valores						
		(-)0,75	(-)0,5	(-)0,25	(+)0,25	(+)0,5	(+)0,75	(+)1
Error medio cuadrático (EMC)	FC	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	LP	0,24	0,09	0,03	0,04	-	-	-
	BETA	0,32	0,10	0,02	0,05	0,09	0,15	-
	UZL	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,02	0,03
	K ₀	0,16	0,02	0,00	0,05	-	-	-
	K ₁	0,03	0,03	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03
	MAXBAS	3,70	1,76	0,52	0,10	0,46	0,88	1,28
Sesgo (PBIAS)	FC	0,80	0,30	0,10	0,00	0,00	0,10	0,10
	LP	-17,80	-10,30	-4,50	3,50	-	-	-
	BETA	20,20	11,50	5,10	-7,90	-11,00	-13,70	-
	UZL	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	K ₀	0,00	0,00	0,00	0,00	-	-	-
	K ₁	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	MAXBAS	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Elaborado por: Crespo D, López T (2019)

5. DISCUSIÓN

Cabrera (2017) evaluó el desempeño del modelo HEC-HMS para la simulación de los procesos de lluvia-escorrentía en la parte alta de la cuenca del río Quinuas, calibrando y validando para un periodo de tres años 2013-2016. Concluye que el modelo simula apropiadamente la escorrentía superficial de la cuenca estudiada al comparar las curvas de caudal observado y simulado y presenta un rendimiento aceptable al momento de simular los procesos hidrológicos. Además, menciona que el programa subestima los caudales máximos, lo que podría relacionarse a las características específicas de una cuenca de páramo y a que el modelo no fue desarrollado para simular esas condiciones.

Si bien es cierto que el programa no modela adecuadamente los caudales máximos, los resultados obtenidos en el presente trabajo muestran que HEC-HMS tiende a sobreestimar los valores de caudal simulado tanto en la calibración como en la validación, a excepción de unos cuantos periodos de tiempo. Además, aunque la eficiencia de la modelación tiene variaciones significativas, el modelo representa adecuadamente el comportamiento de la subcuenca. Los valores bajos en el índice de eficiencia pueden atribuirse, como lo señala Cabrera, a factores ajenos al desempeño del modelo.

Alvear, & Carpio (2005) en el proyecto “Modelación Hidrológica para el pronóstico de caudales mediante la aplicación del paquete HEC-HMS en la cuenca del río Paute”, determinaron que en la cuenca alta del río Paute (donde se localiza la subcuenca del río Tomebamba) los resultados de la etapa de calibración permite reproducir 71% del caudal observado a escala mensual, mientras que en la presente investigación se logró reproducir el 0,3% para la estación de Surucucho y el 25,92% del caudal observado para la estación de Matadero a escala diaria. Es importante mencionar que la eficiencia del proceso de modelación se analiza en tiempo, forma y volumen de los resultados simulados que se ven afectados por el escada temporal en la que se realiza la modelación (Waseem et al., 2017). Al realizar un análisis de sensibilidad, concluyeron que los parámetros con mayor incidencia en la calibración del modelo están relacionados con la impermeabilidad, capacidad de almacenamiento y tiempo de concentración de la cuenca. Finalmente, los autores hallaron que, al dividir la cuenca en subcuencas, los caudales simulados eran mayores a los observados, mientras que, al trabajar como una sola cuenca, se reproducen caudales con picos semejantes a los observados.

En este trabajo se realizó un análisis de sensibilidad dando como resultado que los parámetros que afectan de mayor manera en la generación de caudal son el tiempo de retardo y el número de curva. Así mismo, al considerar el cambio de suelo a lo largo de los años, este tiene una influencia directa en la eficiencia del modelo, ya los valores de KGE varían debido a que el uso de suelo repercute en la generación de flujo superficial y sub-superficial.

Montalván (2017) en la investigación denominada “Evaluación del desempeño del modelo hidrológico HBV - light en una microcuenca de páramo” concluye que el modelo estándar es la estructura más adaptable a la cuenca estudiada, indicando que HBV-light es aplicable a ecosistemas de páramo por las condiciones de adaptabilidad de estructuras hacia la cuenca de interés. Así mismo, Sucozhañay (2018) en el artículo “Impacto de la distribución de pluviómetros en la simulación de escorrentía de una cuenca de pequeña montaña en el sur de Ecuador”, evaluó el impacto de la estimación de lluvia en la modelación de escorrentía en la cuenca de Zhurucay. Para ello analizó el modelo y seleccionó la estructura que mejor represente la escorrentía y el flujo sub-superficial, concluyendo que la estructura del modelo más simple (modelo estándar) presenta mayores rendimientos para representar el subflujo y que el modelo mejora la simulación al trabajar con datos de precipitación mejorados. Adicionalmente, demuestra que la precipitación como dato de entrada podría ser la mayor fuente de incertidumbre del modelo debido a factores como el viento, la elevación, la ubicación topográfica y los errores mecánicos en la medición de la lluvia.

Al igual que Montalván y Sucozhañay, para la aplicación del software HBV-light en este trabajo se empleó su estructura estándar que es la más simple debido a que simula la escorrentía total considerando únicamente dos reservorios, uno para el flujo superficial y sub-superficial y otro que considera el flujo subterráneo. Como indica Montalván (2017), puede que HBV-light se adapte mejor a las condiciones de páramos ya que al aplicar este modelo en la subcuenca, posee mejores índices de KGE que HEC-HMS en el periodo de validación. Es necesario mencionar que los datos de precipitación pueden influir en gran medida para ambos programas en la simulación lo que indica que la modelación podría verse afectada si no se tiene datos precisos de lluvia.

Aunque ambos autores obtienen valores de índices de eficiencias muy altos, en esta investigación se obtienen valores entre insuficientes y satisfactorios lo cual podría atribuirse a



factores externos como el tiempo de modelación empleado, la extensión de la subcuenca estudiada, las intervenciones antrópicas en la zona y la fiabilidad de datos hidrológicos.

6. CONCLUSIONES

Aunque ambos programas presentan limitaciones en la simulación de caudales, en cuanto al ajuste con el caudal observado, se concluye que HBV-light presenta un mejor desempeño en la modelación hidrológica, considerando que los valores del índice de eficiencia KGE son superiores a los obtenidos por HEC-HMS. Adicionalmente, se considera que presenta mejor correlación entre los caudales simulados y observados y un mejor balance hidrológico con sesgos menores en comparación a HEC-HMS.

Si bien en la modelación hidrológica se considera que el valor de eficiencia no varía significativamente durante la calibración y validación cuando el modelo representa efectivamente el comportamiento hidrológico de una cuenca, los valores bajos obtenidos en validación no implican que HEC-HMS no es bueno, sino que estos errores en la eficiencia pueden generarse por diversos factores ajenos al desempeño del modelo, de estos factores resulta necesario destacar que la zona de estudio no cuenta con los suficiente puntos de monitoreo meteorológico, por lo tanto, al momento de interpolar los valores de precipitación obtenidos en la estación, se asume que la microcuenca en donde no se encuentre un punto de monitoreo presenta una precipitación establecida por la interpolación IDW, lo cual podría resultar falso (Ver Anexo 2). Esto también puede estar afectando el rendimiento de HBV- light, aunque no en la misma medida que HEC-HMS, debido posiblemente a las diferencias estructurales y las características propias de cada modelo.

Para la modelación continua, los parámetros más sensibles en HVB- light son BETA y LP que se encuentran relacionados a los procesos de recarga de la subcuenca e influyen en la escurrentía. Por otro lado, el análisis de sensibilidad en HEC-HMS indican que el número de curva y el tiempo de retardo son los parámetros más influyentes en la generación de caudal (hidrograma); estos están relacionados a la generación de escurrentía y al uso de la tierra.



Al evaluar el comportamiento de uso de suelo en el modelo hidrológico se puede observar que en HEC-HMS el valor de KGE mejora al considerar el cambio de uso de suelo, por lo que se asume como válido que el modelo es capaz de considerar y reflejar el cambio de uso de suelo en la simulación de la respuesta hidrológica de la subcuenca; al contrario, HBV-light mantiene los valores de KGE en ambos casos, demostrando que la variación del uso de suelo no influye en el proceso de modelación. Esto puede explicar que los valores de KGE en la validación sean más congruentes en HBV-light, debido a que posibles errores en la información de uso de suelo afecten los resultados en HEC-HMS. Adicionalmente, se concluye que el caudal simulado por HBV-light se ve influenciado por la información climática, mientras que en HEC-HMS este proceso se ve afectado tanto por este factor como por el cambio de uso de suelo.

La capacidad de evaluar el impacto de uso de suelo por parte de HEC-HMS puede atribuirse a que los parámetros más influyentes en el modelo son el número de curva y el tiempo de retardo, los mismos que al estar ligados al uso de la tierra, el tipo de suelo y generación de escorrentía. Por otro lado, en HBV-light varía únicamente los porcentajes de cobertura vegetal que no representan una fuerte influencia en la generación de caudal.

La metodología desarrollada en HEC-HMS para una modelación continua resulta versátil ya que se puede adaptar procesos que han sido utilizadas en modelación de eventos (especialmente inundaciones) y acoplarse a las características de una cuenca de páramo en el tiempo de modelación requeridos. Adicionalmente, el ajuste manual de parámetros reduce la posibilidad de sobredimensionar los valores calibrados, debido a que la variabilidad climática entre zonas de estudio puede generar parámetros diferentes, aunque compartan características.

7. RECOMENDACIONES

- Con el objetivo de comparar resultados, se cree importante realizar la modelación hidrológica de la subcuenca del río Tomebamba considerando otras fuentes de información para la obtención de datos meteorológico e hidrológicos.
- Se considera que una de las características más importantes para seleccionar un modelo que se adapte a la cuenca bajo estudio, es la información disponible y la calidad de datos existentes, esto para asegurar la fiabilidad de los resultados.
- Se deben considerar otros mecanismos para analizar si los resultados de la modelación son buenos, ya que un índice de eficiencia elevado no siempre indica la calidad de la modelación, debido a que se corre el riesgo de que los parámetros o valores calibrados no representen las características de la zona bajo estudio.
- Para evitar incertidumbres en los resultados de la modelación es necesario contar con los puntos de monitoreo necesarios que logren discretizar el comportamiento en cada microcuenca.

8. REFERENCIAS

- Aguilar, A. G. (2010). Modelación hidrológica de crecidas en la cuenca del río Machángara en la ciudad de Quito. Recuperado de <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/2212>
- Aguirre N, M. (2011). La cuenca hidrográfica en la gestión integrada de los recursos hídricos. Revista Virtual REDESMA, 9.
- Ahmed, K., Shahid, S., Ismail, T., Nawaz, N., & Wang, X. J. (2018). Absolute homogeneity assessment of precipitation time series in an arid region of Pakistan.
- Alcácer, C. (2015). Modelización de los recursos hídricos, herramientas de apoyo a la decisión e información (HADIs) en condiciones de incertidumbre. Recuperado de <https://rio.upo.es/xmlui/handle/10433/2308>
- Albek M., & Ogutveren, B (2004). Hydrological modeling of Seydi Suyu watershed (Turkey) with HSPF. Journal of Hydrology 285: 260–271. doi: 10.1016/j.jhydrol. 2003.09.002.
- Allen, R.G.; L. S. Pereira; D. Raes & Smith, M. (1998).- Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56
Disponibile en : <http://www.fao.org/docrep/009/x0490s/x0490s00.htm>
- Almorox, J. (2007). Evapotranspiración Potencias según Thonthwaite. 19.
- Alvear, C. M., & Carpio, J. C. (2005). Modelación Hidrológica para el pronóstico de caudales mediante la aplicación del Paquete HEC - HMS en la Cuenca del Río Paute. Recuperado de <http://repositorio.espe.edu.ec/jspui/handle/21000/2090>
- Arevalo, P., Ortiz, E., Pujol, L., & Guna, V. (2007). Sistema de predicciones hidrológicas en tiempo real en las cuencas de Galicia Costa. El sistema ARTEMIS. 10.
- Astorayame, M. A. (2017). Análisis y evaluación comparativa de modelos hidrológicos agrupados y semidistribuidos aplicados al pronóstico de caudales diarios del río Chillón. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Recuperado de <http://cybertesis.unmsm.edu.pe/handle/cybertesis/7406>
- Bennett, T. (1998). Development and application of a continuous soil moisture accounting algorithm for the Hydrologic Engineering Center Hydrologic Modeling System (HEC-HMS) (University of California).
- Bergström, S. (1992). The HBV Model: Its Structure and Applications (Vol. 4). SMHI.



- Buytaert, W., Céleri, R., & Bièvre, B. (2003). Modelando el comportamiento hidrológico de microcuencas de páramo en el sur del Ecuador con top model. 31-32, 249-264.
- Buytaert, W. (2012). Water for cities: The impact of climate change and demographic growth in the tropical Andes. *Water Resources Research* 48(8): 1-13. doi: 10.1029/2011WR011755.
- Buytaert, W. (2013). Water resources in South America: sources and supply, pollutants and perspectives. pp.106-113. In: *Proceedings of the IAHS-IAPSO-IASPEI Assembly, Gothenburg, Sweden, July 2013* (IAHS Publ. 359, 2013).
- Cacoango, J. (2014). Modelamiento de la microcuenca del río Illangama con la utilización del modelo hidrológico Soil and Water Assessment Tool «Swat». Bolívar. (Universidad Central del Ecuador). Recuperado de <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/2469>
- Cabrera, J. (2012). Calibración de Modelos Hidrológicos. Recuperado de http://www.imefen.uni.edu.pe/Temas_interes/modhidro_2.pdf
- Cabrera, J. (2017). Evaluación del modelo HEC-HMS para la simulación hidrológica de una cuenca de páramo. Cuenca-Ecuador.
- Cammeraat, E. L. H., Cerdà, A., & Imeson, A. C. (2010). Ecohydrological adaptation of soils following land abandonment in a semi-arid environment. *Ecohydrology*, 3(4), 421–430. <https://doi.org/10.1002/eco.161>
- Chow, V., Maidment, D., & Mays, L. (1988). *Applied Hidrology*. Recuperado de <https://epdf.tips/download/applied-hydrology.html>
- Cleveland, R., Cleveland, W., & Terpenning, I. (1990). STL: A Seasonal-Trend Decomposition Procedure Based on Loess. *Journal of Official Statistics*, 6(1), 32.
- Cordero, P., Vanegas, S., & Hermida, M. A. (2015). La biodiversidad urbana como síntoma de una ciudad sostenible. Estudio de la zona del Yanuncay en Cuenca, Ecuador. *Maskana*, 6(1), 53-67.
- Cunderlik, J. (2003). Hydrologic Model Selection for the CFCAS Project: Assessment of Water Resources Risk and Vulnerability to Changing Climatic Conditions. Recuperado de <https://ir.lib.uwo.ca/wrrr/9>
- De Luque Söllheim, A. L. (2011). Cualificación y homogenización de las series climáticas mensuales de precipitación de Canarias. Estimación de Tendencias de la Precipitación. Memoria Explicativa de Resultados.



- Devia, G. K., Ganasri, B. P., & Dwarakish, G. S. (2015). A Review on Hydrological Models. *Aquatic Procedia*, 4, 1001-1007. <https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.126>
- Díaz, Á., & Mercado, T. (2017). Determinación del número de curva en la subcuenca de Betancí (Córdoba, Colombia) mediante teledetección y SIG. *Ingeniería y Desarrollo*, 35(2), 452-470.
- Díaz, G., Sánchez, I., Quiroz, R., Garatuza, J., Watts, C., & Cruz, I. R. (2008). Interpolación espacial de la precipitación pluvial en la zona de barlovento y sotavento del Golfo de México. *Agricultura técnica en México*, 34(3), 279-287.
- Donoso, M. E. (2009). La cuenca del río Paute: diagnóstico y propuesta de manejo integral. *Políticas de desarrollo agropecuario*. Recuperado de <http://repositorio.flacsoandes.edu.ec/handle/10469/985>
- Drakos, G. (2018, agosto 26). How to select the Right Evaluation Metric for Machine Learning Models: Part 1 Regression Metrics. Recuperado de Towards Data Science website: <https://towardsdatascience.com/how-to-select-the-right-evaluation-metric-for-machine-learning-models-part-1-regression-metrics-3606e25beae0>
- Estrada S, V., Moya, P., & Miguel, R. (2012). Modelación hidrológica con HEC-HMS en cuencas montañosas de la región oriental de Cuba. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 33(1), 71-80.
- Faustino, J., & Jiménez, F. (2000). Manejo de cuencas hidrográficas. Recuperado de <http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr:80/handle/11554/2946>
- Feldman, A. D. (2000). *Hydrologic Modeling System Technical Reference Manual*, (March).
- GAD Cuenca (2015). Plan de ordenamiento territorial del Cantón Cuenca. Recuperado de http://www.cuenca.gob.ec/?q=system/files/PDOT_Completo_2015.pdf
- GAD San Joaquín. (2015). Plan de ordenamiento territorial de San Joaquín. Recuperado de <http://gadsanjoaquin.gob.ec/2015-o-y-g/>
- GAD Sayausí. (2015). Actualización del plan de desarrollo y ordenamiento territorial. Recuperado de http://www.sayausi.gob.ec/Transparencia/2016/PDYOT_Sayausi_mayo_2016_ultimo.pdf
- García, A. (2008). El derecho humano al agua. Recuperado de <http://www.marcialpons.es/libros/el-derecho-humano-al-agua/9788481649390/>



- Gaspari, F. J., Rodríguez, A. M., Senisterra, G. E., Delgado, M. I., & Besteiro, S. (2013). Elementos metodológicos para el manejo de cuencas hidrográficas (Primera). Recuperado de <http://hdl.handle.net/10915/27877>
- Guijarro, J. (2018). Homogeneización de series climáticas con Climatol.
- Gómez, Á. J. (2016). Repositorio institucional UN (masters). Universidad Nacional de Colombia - Sede Bogotá. Recuperado de <http://www.bdigital.unal.edu.co/53581/>
- Gutierrez, C. (2014). Hidrología Básica Y Aplicada. Recuperado de <https://www.google.com/search?q=hidrologia+basica+y+aplicada+carlos+gutierrez+caiza&rlz=1C1EJFC>
- Havrylenko, S., Damiano, F., & Pizarro, M. J. (2012). Estimación del número de curva en la Cuenca del Río Arrecifes (provincia de Buenos Aires).
- Ibáñez, E. (2012). Elaboracion de un plan de manejo ambiental para la conservacion de la sub cuenca del Río San Pablo en el canton La Mana, provincia de Cotopaxi. (Universidad Técnica de Cotopaxi). Recuperado de <http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/1577>
- Ibañez, A., Moreno, H., & Gisbert, J. (2017). Valores del n° de curva (cálculo de la escorrentía). 11.
- Ibarra, S., Romero, R., Poulin, A., Glaus, M., Cervantes, E., Bravo, J., ... Castillo, E. (2016). Sensitivity Analysis in Hydrological Modeling for the Gulf of México. *Procedia Engineering*, 154, 1152-1162. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.531>
- INAMHI (2006). Anuarios Hidrológicos. Recuperado de <http://www.serviciometeorologico.gob.ec/wp-content/uploads/anuarios/hidrologicos/>
- INTAGRI. (2017). Clasificación del Suelo: WRB y Soil Taxonomy. (28), 5.
- Instituto Geográfico Militar [IGM]. (2013). Geoportal. Recuperado de <http://www.geoportaligm.gob.ec/portal/>
- Jiang, Y., Liu, C., Li, X., Liu, L., & Wang, H. (2015). Rainfall-runoff modeling, parameter estimation and sensitivity analysis in a semiarid catchment. *Environmental Modelling & Software*, 67, 72-88. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.01.008>



- Li, W., Lin, K., Zhao, T., Lan, T., Chen, X., Du, H., & Chen, H. (2019). Risk assessment and sensitivity analysis of flash floods in ungauged basins using coupled hydrologic and hydrodynamic models. *Journal of Hydrology*, 572, 108-120. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.03.002>
- Longares, L. A., Novak, K., & Castillo, E. del. (2011). Cuantificación de los gradientes climáticos altitudinales en la vertiente Sur del Macizo del Moncayo a partir de una nueva red de estaciones automáticas en altura.
- Maderey, L. (2005). Principios de Hidrogeografía. Estudio Del Ciclo Hidrológico (Primera). Recuperado de <https://books.google.com.ec/books?id=0S3XDWsDzSAC>
- MAGAP. Taxonomía. Recuperado de: <http://geoportal.magap.gob.ec/inventario.html>
- Makridakis, S. (1995). Evaluating Accuracy (or Error) Measures. *International Journal of Forecasting*, 9(4), 527-529. [https://doi.org/10.1016/0169-2070\(93\)90079-3](https://doi.org/10.1016/0169-2070(93)90079-3)
- Medina, Y., & Muñoz, E. (2018). Evaluación de un modelo hidrológico a través de un Análisis de Sensibilidad Dinámico. 2.
- Mejuto, M. F., Mayorga, A. V., & Fernández, S. C. (1997). La utilización de modelos en hidrología. Ensayos: *Revista de la Facultad de Educación de Albacete*, (12), 305-318.
- Mendoza, M., Bocco, G., López Granados, E., & Bravo, M. (2002). Implicaciones hidrológicas del cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo: una propuesta de análisis espacial a nivel regional en la cuenca cerrada del lago de Cuitzeo, Michoacán. *Investigaciones geográficas*, (49), 92-117.
- Metcalfe, P., Beven, K., & Freer, J. (2015). Dynamic TOPMODEL: A new implementation in R and its sensitivity to time and space steps. *Environmental Modelling & Software*, 72, 155-172. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.06.010>
- Montalván, I. M. (2017). Evaluación del desempeño del modelo hidrológico HBV - light en una microcuenca de páramo. Recuperado de <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/26985>
- Natural Resources Conservation Services. (2015). Illustrated Guide to Soil Taxonomi. Recuperado de https://www.nrcs.usda.gov/wps/PA_NRCSCconsumption/download/?cid=stelprdb1247203.pdf



- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., & Williams, J. R. (2011). Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009 [Technical Report]. (Reporte Técnico N.o 406; p. 647). Recuperado de Texas Water Resources Institute website: <https://swat.tamu.edu/media/99192/swat2009-theory.pdf>
- Orsolini, H. E., Zimmermann, E. D., & Basile, P. A. (2000). Hidrología: procesos y métodos. Universidad Nacional de Rosario. Recuperado de <http://bases.bireme.br/cgi-bin/wxislind.exe/iah/online/?IscScript=iah/iah.xis&src=google&base=REPIDISCA&lang=p&nextAction=lnk&exprSearch=30283&indexSearch=ID>
- Peñafiel, A. (2014). Evaluación De La Calidad Del Agua Del Río Tomebamba Mediante El Índice Ica Del Instituto Mexicano De Tecnología Del Agua. Universidad De Cuenca, Cuenca. Recuperado de <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/20919/1/tesis.pdf>
- Pesántez, J. D. (2015). Propuesta de modelo de gestión de la subcuenca del río Tomebamba, como herramienta de manejo integrado y conservación. Recuperado de <http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/4576>
- Rao, Z., Potter, B., Webb, D., & Parkin, R. (2009). Sustainable water resources management: River basin modelling and decision support framework. Wuhan University Journal of Natural Sciences, 14(6), 543-551. <https://doi.org/10.1007/s11859-009-0615-9>
- Refsgaard, J. C. (1996). Terminology, Modelling Protocol And Classification of Hydrological Model Codes. En M. B. Abbott & J. C. Refsgaard (Eds.), Distributed Hydrological Modelling (pp. 17-39). Dordrecht: Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-009-0257-2_2
- Reggiani, P., & Rientjes, T. H. M. (2005). Flux parameterization in the representative elementary watershed approach: Application to a natural basin: FLUX PARAMETERIZATION IN THE REW APPROACH. Water Resources Research, 41(4). <https://doi.org/10.1029/2004WR003693>
- Remesan, R., & Mathew, J. (2015). Introduction. En R. Remesan & J. Mathew (Eds.), Hydrological Data Driven Modelling: A Case Study Approach (pp. 1-17). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-09235-5_1
- Riccardi, G., Stenta, H., Scuderi, C., Basile, P., Zimmermann, E., & Trivisonno, F. (2013). Aplicación de un modelo hidrológico- hidráulico para el pronóstico de niveles de agua en tiempo real. 4, 23.



- Ruiz, F. (2017). Análisis del funcionamiento del modelo HBV a partir de su aplicación a dos cuencas con diferentes características e información hidro-metereologica. 13.
- Sánchez, F. J. (2017). Hidrología superficial y Subterránea (1.a ed.). Recuperado de <http://hidrologia.usal.es/Complementos/Hec-hms-4.pdf>
- Segarra, J. (2016). Impacto del cambio del uso de suelo sobre la calidad del agua del Río Tomebamba (Universidad del Azuay). Recuperado de <http://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/6481/1/12620.pdf>
- Seibert, J. (2005). HBV light User's Manual. 32.
- SENAGUA. (2002). Propuesta de demarcación hidrográfica.
- SENAMHI. (2016). Modelamiento Hidrológico del río Zarumilla. 40.
- Scharffenberg, B., Bartles, M., Brauer, T., Fleming, M., & Karlovits, C. (2018). Hydrologic Modeling System User's Manual, (September).
- Sucozhañay, A. (2018). Impact of rain gauge density on hydrological simulation in a small mountain catchment in southern Ecuador. Recuperado de <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/29795>
- Széles, B. Comparison of HEC-HMS model and Topmodel for runoff prediction in Lampachi Basin. (2013). Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/292257477_Comparison_of_HEC-HMS_model_and_Topmodel_for_runoff_prediction_in_Lampachi_Basin
- Timbe, E. (2008). Asistencia técnica en hidrología para el desarrollo de herramienta de caracterización y monitoreo hidrológico y evaluación de alternativas de gestión de los recursos hídricos. (SER-002-2007) (p. 128). Paute: Consejo de gestión de aguas de la cuenca del Paute. Todini, E., & Ciarapica, L. (2002). THE TOPKAPI MODEL. 39.
- Tobón, C., & Gil, E. (2016). Hydrological modelling of Chingaza páramo, Colombia. Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín, 69(2), 7919-7933. <https://doi.org/10.15446/rfna.v69n2.59137>
- TOPMODEL. 2011. Implementation of the hydrological model TOPMODEL in R version 0.7.2-2 (septiembre 2011). Buytaert W. Imperial College London. Disponible en: <http://cran.r-project.org/web/packages/topmodel/topmodel.pdf>.



- Tucci, C. E. M., Sul, U. F. do R. G. do. (1998). Modelos hidrológicos. UFRGS. Recuperado de <http://bases.bireme.br/cgi>
- Vasco, C., & Antonio, D. (2016). Aplicación de un modelo semidistribuido de precipitación-escurrimiento para la evaluación de los recursos hídricos en la cuenca del río Jalón. Recuperado de <https://riunet.upv.es/handle/10251/67872>
- Vásquez, A., Mejía, A., Faustino, J., & Terán, R. (2016). Manejo y gestión de cuencas hidrográficas (Primera). Recuperado de <https://libreriafavorita.blogspot.com/2018/09/libro-manejo-y-gestion-de-cuencas.html>
- Wallach, D., Makowski, D., Jones, J. W., & Brun, F. (2019). Uncertainty and Sensitivity Analysis. En Working with Dynamic Crop Models (pp. 209-250). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811756-9.00006-X>
- Waseem, M., Mani, N., Andiego, G., & Usman, M. (2017). A REVIEW OF CRITERIA OF FIT FOR HYDROLOGICAL MODELS. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), 4(11), 8.
- Weber, J., & Apestegui, L. (2014, septiembre 23). Parámetros de los modelos de Kostiakov y Lewis-Kostiakov para áreas permeables del ejido urbano de la ciudad de Córdoba. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/266475613_Parametros_de_los_modelos_de_Kostiakov_y_Lewis-Kostiakov_para_areas_permeables_del_ejido_urbano_de_la_ciudad_de_Cordoba
- Willems, P. (2014). Parsimonious Rainfall-runoff Model Construction Supported by Time Series Processing and Validation of Hydrological Extremes – Part 1: Stepwise Model-Structure Identification and Calibration Approach. J. Hydrol. 510, 578-590.
- World Vision. (2004). Manual de Manejo de Cuencas. El Salvador. 154p. Recuperado de <https://es.scribd.com/document/127392692/Manual-de-Manejo-de-Cuencas-Vision-Mundial-Mod>
- Xu, Q., Chen, X., Bi, J., Ouyang, R., & Ren, L. (2015). Simulating hydrological responses with a physically based model in a mountainous watershed. Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences, 370, 153-159. <https://doi.org/10.5194/piahs-370-153-2015>
- Yapo, P. O., Gupta, H. V., & Sorooshian, S. (1996). Automatic calibration of conceptual rainfall-runoff models: sensitivity to calibration data. Journal of Hydrology, 181(1-4), 23-48. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(95\)02918-4](https://doi.org/10.1016/0022-1694(95)02918-4)



Zapata, R. (2014). Validación del modelo HEC HMS v 3.5, en la cuenca hidrológica del río Actopan, Veracruz, Facultad de Instrumentación Electrónica y Ciencias Atmosféricas, Universidad Veracruzana.

Zúñiga, R., Muñoz, E., & Arumí, J. L. (2012). Estudio de los procesos hidrológicos de la cuenca del Río Diguillín. Obras y proyectos, (11), 69-78. <https://doi.org/10.4067/S0718-28132012000100007>



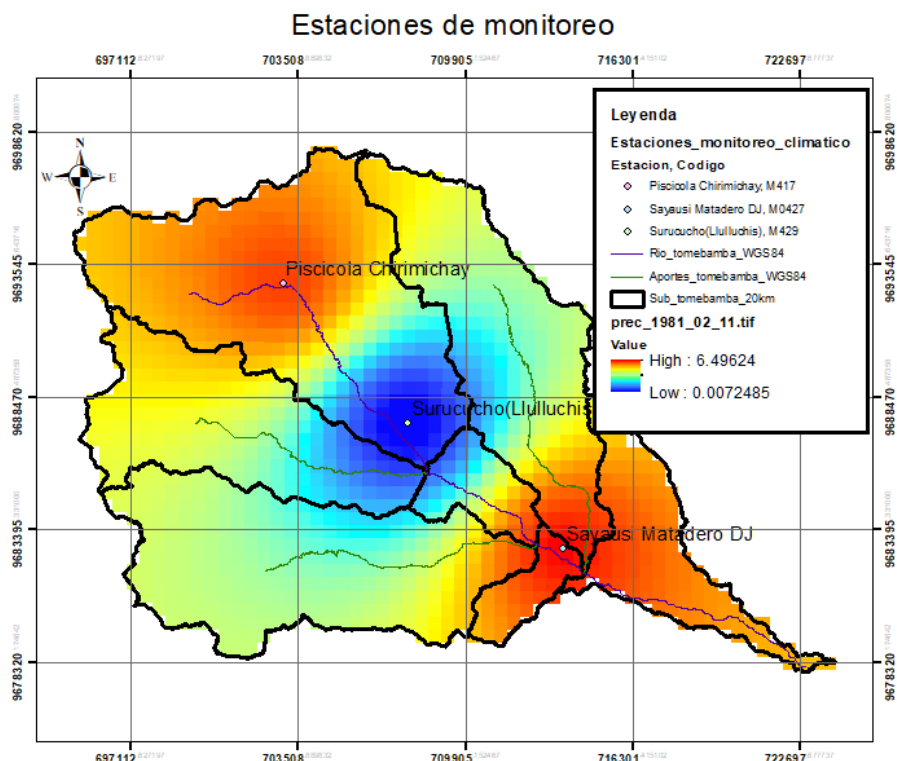
9. ANEXOS

Anexo 1. Número máximo de horas de sol

Northern Hemisphere												Lat. deg.	Southern Hemisphere											
Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	July	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec		Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	July	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
0,0	6,6	11,0	15,6	21,3	24,0	24,0	17,6	12,8	8,3	2,3	0,0	70	24,0	17,4	13,0	8,4	2,7	0,0	0,0	6,4	11,2	15,7	21,7	24,0
2,1	7,3	11,1	15,3	19,7	24,0	22,3	17,0	12,7	8,7	4,1	0,0	68	21,9	16,7	12,9	8,7	4,3	0,0	1,7	7,0	11,3	15,3	19,9	24,0
3,9	7,8	11,2	14,9	18,7	22,0	20,3	16,4	12,7	9,0	5,2	1,9	66	20,1	16,2	12,8	9,1	5,3	2,0	3,7	7,6	11,3	15,0	18,8	22,1
5,0	8,2	11,2	14,7	17,9	20,3	19,2	16,0	12,6	9,3	6,0	3,7	64	19,0	15,8	12,8	9,3	6,1	3,7	4,8	8,0	11,4	14,7	18,0	20,3
5,7	8,5	11,3	14,4	17,3	19,2	18,4	15,7	12,6	9,5	6,6	4,8	62	18,3	15,5	12,7	9,6	6,7	4,8	5,6	8,3	11,4	14,5	17,4	19,2
6,4	8,8	11,4	14,2	16,8	18,4	17,7	15,3	12,5	9,7	7,1	5,6	60	17,6	15,2	12,6	9,8	7,2	5,6	6,3	8,7	11,5	14,3	16,9	18,4
6,9	9,1	11,4	14,1	16,4	17,8	17,2	15,1	12,5	9,9	7,5	6,2	58	17,1	14,9	12,6	9,9	7,6	6,2	6,8	8,9	11,5	14,1	16,5	17,8
7,3	9,3	11,5	13,9	16,0	17,3	16,8	14,8	12,4	10,1	7,9	6,7	56	16,7	14,7	12,5	10,1	8,0	6,7	7,2	9,2	11,6	13,9	16,1	17,3
7,7	9,5	11,5	13,8	15,7	16,8	16,4	14,6	12,4	10,2	8,2	7,1	54	16,3	14,5	12,5	10,2	8,3	7,2	7,6	9,4	11,6	13,8	15,8	16,9
8,0	9,7	11,5	13,6	15,4	16,5	16,0	14,4	12,4	10,3	8,5	7,5	52	16,0	14,3	12,5	10,4	8,6	7,5	8,0	9,6	11,6	13,7	15,5	16,5
8,3	9,8	11,6	13,5	15,2	16,1	15,7	14,3	12,3	10,4	8,7	7,9	50	15,7	14,2	12,4	10,5	8,8	7,9	8,3	9,7	11,7	13,6	15,3	16,1
8,6	10,0	11,6	13,4	15,0	15,8	15,5	14,1	12,3	10,6	9,0	8,2	48	15,4	14,0	12,4	10,6	9,0	8,2	8,5	9,9	11,7	13,4	15,0	15,8
8,8	10,1	11,6	13,3	14,8	15,5	15,2	14,0	12,3	10,7	9,2	8,5	46	15,2	13,9	12,4	10,7	9,2	8,5	8,8	10,0	11,7	13,3	14,8	15,5
9,1	10,3	11,6	13,2	14,6	15,3	15,0	13,8	12,3	10,7	9,4	8,7	44	14,9	13,7	12,4	10,8	9,4	8,7	9,0	10,2	11,7	13,3	14,6	15,3
9,3	10,4	11,7	13,2	14,4	15,0	14,8	13,7	12,3	10,8	9,6	9,0	42	14,7	13,6	12,3	10,8	9,6	9,0	9,2	10,3	11,7	13,2	14,4	15,0
9,5	10,5	11,7	13,1	14,2	14,8	14,6	13,6	12,2	10,9	9,7	9,2	40	14,5	13,5	12,3	10,9	9,8	9,2	9,4	10,4	11,8	13,1	14,3	14,8
9,6	10,6	11,7	13,0	14,1	14,6	14,4	13,5	12,2	11,0	9,9	9,4	38	14,4	13,4	12,3	11,0	9,9	9,4	9,6	10,5	11,8	13,0	14,1	14,6
9,8	10,7	11,7	12,9	13,9	14,4	14,2	13,4	12,2	11,1	10,1	9,6	36	14,2	13,3	12,3	11,1	10,1	9,6	9,8	10,6	11,8	12,9	13,9	14,4
10,0	10,8	11,8	12,9	13,8	14,3	14,1	13,3	12,2	11,1	10,2	9,7	34	14,0	13,2	12,2	11,1	10,2	9,7	9,9	10,7	11,8	12,9	13,8	14,3
10,1	10,9	11,8	12,8	13,6	14,1	13,9	13,2	12,2	11,2	10,3	9,9	32	13,9	13,1	12,2	11,2	10,4	9,9	10,1	10,8	11,8	12,8	13,7	14,1
10,3	11,0	11,8	12,7	13,5	13,9	13,8	13,1	12,2	11,3	10,5	10,1	30	13,7	13,0	12,2	11,3	10,5	10,1	10,2	10,9	11,8	12,7	13,5	13,9
10,4	11,0	11,8	12,7	13,4	13,8	13,6	13,0	12,2	11,3	10,6	10,2	28	13,6	13,0	12,2	11,3	10,6	10,2	10,4	11,0	11,8	12,7	13,4	13,8
10,5	11,1	11,8	12,6	13,3	13,6	13,5	12,9	12,1	11,4	10,7	10,4	26	13,5	12,9	12,2	11,4	10,7	10,4	10,5	11,1	11,9	12,6	13,3	13,6
10,7	11,2	11,8	12,6	13,2	13,5	13,3	12,8	12,1	11,4	10,8	10,5	24	13,3	12,8	12,2	11,4	10,8	10,5	10,7	11,2	11,9	12,6	13,2	13,5
10,8	11,3	11,9	12,5	13,1	13,3	13,2	12,8	12,1	11,5	10,9	10,7	22	13,2	12,7	12,1	11,5	10,9	10,7	10,8	11,2	11,9	12,5	13,1	13,3
10,9	11,3	11,9	12,5	12,9	13,2	13,1	12,7	12,1	11,5	11,0	10,8	20	13,1	12,7	12,1	11,5	11,1	10,8	10,9	11,3	11,9	12,5	13,0	13,2
11,0	11,4	11,9	12,4	12,8	13,1	13,0	12,6	12,1	11,6	11,1	10,9	18	13,0	12,6	12,1	11,6	11,2	10,9	11,0	11,4	11,9	12,4	12,9	13,1
11,1	11,5	11,9	12,4	12,7	12,9	12,9	12,5	12,1	11,6	11,2	11,1	16	12,9	12,5	12,1	11,6	11,3	11,1	11,1	11,5	11,9	12,4	12,8	12,9
11,3	11,6	11,9	12,3	12,6	12,8	12,8	12,5	12,1	11,7	11,3	11,2	14	12,7	12,4	12,1	11,7	11,4	11,2	11,2	11,5	11,9	12,3	12,7	12,8
11,4	11,6	11,9	12,3	12,6	12,7	12,6	12,4	12,1	11,7	11,4	11,3	12	12,6	12,4	12,1	11,7	11,4	11,3	11,4	11,6	11,9	12,3	12,6	12,7
11,5	11,7	11,9	12,2	12,5	12,6	12,5	12,3	12,1	11,8	11,5	11,4	10	12,5	12,3	12,1	11,8	11,5	11,4	11,5	11,7	11,9	12,2	12,5	12,6
11,6	11,7	11,9	12,2	12,4	12,5	12,4	12,3	12,0	11,8	11,6	11,5	8	12,4	12,3	12,1	11,8	11,6	11,5	11,6	11,7	12,0	12,2	12,4	12,5
11,7	11,8	12,0	12,1	12,3	12,3	12,3	12,2	12,0	11,9	11,7	11,7	6	12,3	12,2	12,0	11,9	11,7	11,7	11,7	11,8	12,0	12,1	12,3	12,3
11,8	11,9	12,0	12,1	12,2	12,2	12,2	12,1	12,0	11,9	11,8	11,8	4	12,2	12,1	12,0	11,9	11,8	11,8	11,8	11,9	12,0	12,1	12,2	12,2
11,9	11,9	12,0	12,0	12,1	12,1	12,1	12,1	12,0	12,0	11,9	11,9	2	12,1	12,1	12,0	12,0	11,9	11,9	11,9	11,9	12,0	12,0	12,1	12,1
12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0

Fuente: Allen, Pereira, Raes & Smith (1998)

Anexo 2. Proceso de interpolación IDW



En este caso se representa la distribución espacial de la precipitación perteneciente al 11 de febrero de 1981, como se observa en la imagen los puntos más cercanos a las estaciones están más influenciados que los puntos más alejados, así que se estima una menor precipitación en un punto determinado de la subcuenca conforme más distancia exista entre dicho punto y las estaciones Piscicola Chirimachay y Sayausí Matadero DJ. La coloración anaranjada representa las regiones con mayor precipitación con un máximo de 6,5 mm; por el contrario, el color azul representa las secciones de la subcuenca con menor precipitación con un mínimo de 0,007 mm.